

FLÁVIA RENATA FERREIRA

Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR

São Paulo  
2019

FLÁVIA RENATA FERREIRA

Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

São Paulo  
2019



ATA DE DEFESA

Aluno: 3138 - 8079441 - 3 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Tese do(a) Senhor(a) Flávia Renata Ferreira no Programa: Engenharia de Transportes, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 17 dias do mês de setembro de 2019, no(a) realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Flávia Renata Ferreira, apresentada para a obtenção do título de Doutora intitulada:

"Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LIDAR"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Jorge Pimentel Cintra	Presidente	MP - USP	<u>Aprovado</u>
Diogenes Cortijo Costa	Titular	UNICAMP - Externo	<u>APROVADO</u>
Jorge Luiz Alves Trabanco	Titular	UNICAMP - Externo	<u>APROVADO</u>
Carlos Henrique Grohmann de Carvalho	Titular	IEE - USP	<u>Aprovado</u>
Mauricio Galo	Suplente	UNESP - Externo	<u>Aprovado</u>

Resultado Final: aprovado

Parecer da Comissão Julgadora \*

Eu, Elias Alves de Almeida, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 17 dias do mês de setembro de 2019.

Diogenes Cortijo Costa

Jorge Luiz Alves Trabanco

Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Mauricio Galo

Jorge Pimentel Cintra

Presidente da Comissão Julgadora

\* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em 14/10/19 e, portanto, o(a) aluno(a) Flávia Renata Ferreira jus ao título de Doutora em Ciências obtido no Programa Engenharia de Transportes.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Prof. Dr. Raúl González Lima  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

FLÁVIA RENATA FERREIRA

Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Professor Titular Jorge Pimentel Cintra

São Paulo  
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de novembro de 2019.

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:

*Jorge P. Cintra*

#### Catálogo-na-publicação

Ferreira, Flávia Renata

Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR / F.  
R. Ferreira -- versão corr. -- São Paulo, 2019.  
201 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia de Transportes.

1.ALTIMETRIA 2.CONTROLE DA QUALIDADE 3.LASER I.Universidade  
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de  
Transportes II.t.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha saúde, disposição e inspiração durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Professor Jorge Pimentel Cintra pela orientação, atenção, incentivo e exemplo.

Aos meus pais Hélio e Hilda, e meus irmãos France e Fabrício.

Ao César Francisco de Paula e ao Jefferson Rocco pela colaboração ao fornecer insumos e programas que possibilitaram a realização desse trabalho.

À Prefeitura Municipal de Campinas e às empresas Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda e BASE Aerofotogrametria e Projetos S. A. pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

Aos colegas, professores e funcionários da Escola Politécnica da USP pela atenção, dedicação e companheirismo durante a vivência acadêmica.

À CPRM – Serviço Geológico do Brasil, pela liberação parcial das minhas atividades profissionais para que eu tivesse tempo para me dedicar à minha pesquisa de doutorado.

## RESUMO

FERREIRA, Flávia Renata. **Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR**. 2019. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

O LiDAR (acrônimo de *Light Detection And Ranging*) aerotransportado tem sido amplamente utilizado como tecnologia complementar de mapeamento e, empregado conjuntamente com a aerofotogrametria, está se firmando como opção dominante de aquisição de dados para a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), modelos digitais 3D de cidades, monitoramento de florestas e vegetação, monitoramento e planejamento urbano, gestão de recursos naturais, gestão de desastres naturais, mapeamento de corredores urbanos e ambientais, modelagem hidrológica, monitoramento do carbono florestal, entre outras. Com as coordenadas de cada pulso refletido, obtidas graças ao uso de sistemas de posicionamento global por satélites e de sistema de navegação inercial durante a varredura, e da classificação de cada sinal de retorno tornou-se possível avaliar a acurácia planimétrica e altimétrica dos pontos LiDAR por meio de modelos matemáticos ou de algoritmos que reconstróem objetos a partir de uma grande quantidade de pontos. Há muitas pesquisas publicadas sobre a acurácia planimétrica dos dados LiDAR, mas há poucas que abordam com maior profundidade as formas de avaliar sua acurácia altimétrica. Como a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR é um tema bastante relevante e ainda pouco explorado, tornou-se interessante aprofundar nesse estudo, surgindo então a motivação e o objetivo da presente pesquisa. Este trabalho propõe a avaliação da acurácia altimétrica de dados LiDAR através de quatro métodos, utilizando pontos cotados e uma TIN: a) um método inspirado na norma brasileira, b) um método baseado na metodologia do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (NDEP), c) um método que quantifica a discrepância entre curvas de nível, e d) um método que avalia os erros altimétricos dos pontos LiDAR situados entre curvas de nível consecutivas. Os métodos (c) e (d) foram desenvolvidos para este trabalho e os demais foram adaptados. A partir dos resultados deste trabalho, recomenda-se, quando se dispõem de pontos de controle, o emprego do primeiro método e a seguir o segundo para, conjuntamente, realizar a avaliação da acurácia altimétrica. Quando esses pontos não estão disponíveis, recomenda-se o emprego dos outros dois: o

terceiro tem como contribuição verificar se a definição das curvas de nível geradas pelos pontos LiDAR está correta, isto é, se está compatível como os métodos clássicos e o quarto tem a vantagem de avaliar a coerência de todos os pontos LiDAR e não só uma pequena amostra. Além disso, o primeiro e o quarto métodos se adaptam melhor para uma avaliação da acurácia altimétrica geral da área, o segundo se adapta para uma avaliação da acurácia altimétrica em áreas cuja cobertura ou tipo de uso é composto de regiões homogêneas, e o terceiro método é adequado quando se quer comparar as diferenças entre as curvas de nível produzidas a partir de dados LiDAR e as geradas por um produto de referência. Com essas orientações, surgidas dos experimentos realizados, o usuário pode escolher os testes a empregar em seu caso concreto.

**Palavras-chave:** LiDAR. Acurácia altimétrica. Curvas de nível. TIN.

## ABSTRACT

FERREIRA, Flávia Renata. **Proposals for assessing the altimetric accuracy of LiDAR data**. 2019. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Airborne LiDAR (acronym for Light Detection And Ranging) has been widely used as a complementary mapping technology, and jointly used with aerial photogrammetry, has been established as a mainstream option for data acquisition to generate Digital Elevation Models (DEM), 3D digital models of cities, forest stand and vegetation monitoring, urban planning and monitoring, natural resource management, natural disaster management, urban and environmental corridors mapping, hydrological modeling, forest carbon monitoring, among others. With coordinate information of each reflected pulse obtained by using the Global Positioning System Satellites and the Inertial Navigation System during scanning, besides the classification of each return signal, it was possible to evaluate the planimetric and altimetric accuracy of each LiDAR point through mathematical models or algorithms that reconstruct objects from a large number of points. There is much published research in conference proceedings and in journals about the planimetric accuracy of LiDAR data, but there are few researches that go deeper into the ways of assessing its altimetric accuracy. As the evaluation of the altimetric accuracy of LiDAR data is a very relevant subject and still a little explored topic, it attracted interest to this research. This work proposes assessing the altimetric accuracy of LiDAR data through four analogue application methods, using control points and a TIN: a) a method inspired by the Brazilian standard, b) a method based on the National Digital Elevation Program (NDEP), c) a method that quantifies the discrepancy between contours, and d) a method that evaluates the altimetric errors of the LiDAR points located between consecutive contours. Methods c) and d) were developed for this work and the others were adapted. From the results of this work, we recommend using the first method, and then the second, to jointly perform the assessment of the altimetric accuracy when control points are available. When these control points are not available, using the other two is recommended. The contribution of third one is to verify if the definition of the contours generated by the LiDAR points is correct; that is, compatible, as the classic methods and the fourth have the advantage of assessing the consistency of all LiDAR points

and not just a small sample. In addition, the first and fourth methods are best suited for assessing the overall altimetric accuracy of the area. The second one is adapted for assessing altimetric accuracy in areas whose coverage or type of use are homogeneous, and the third method is appropriate when one wants to compare the differences between the contours produced from LiDAR data and those generated by a reference product. With these guidelines, arising from the experiments performed, users can choose the tests to employ in their cases.

**Keywords:** LiDAR. Altimetric accuracy. Contours. TIN.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Mecanismos de varredura LiDAR .....	23
Figura 2.2 - Ilustração do pulso de retorno discreto e da digitalização da forma de onda em três casos. ....	25
Figura 4.1 - Ilustração do retângulo envolvente, quadrantes, distância diagonal e localização dos pontos de controle.....	53
Figura 4.2 - Acurácia Altimétrica Relativa. ....	70
Figura 5.1 - Faces triangulares ligadas por bordas e vértices. ....	74
Figura 5.2 - Árvore de derivações da triangulação 2D. ....	75
Figura 5.3 - Triangulação de Delaunay. ....	75
Figura 5.4 - Diagrama de Voronoi. ....	76
Figura 5.5 - Triangulação Restrita e Triangulação de Delaunay Restrita.....	78
Figura 6.1 - Localização da área de estudo, no município de Campinas.....	80
Figura 6.2 - Pontos do modelo geoidal da região de estudo, com os valores de ondulação. ....	82
Figura 6.3 - Curvas de nível interpoladas pelo programa LASTools.....	83
Figura 6.4 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools, com simplificação de elementos e limpeza de linhas de até 10 m de comprimento. ....	84
Figura 6.5 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools, com simplificação de elementos de até 5 m, limpeza de linhas de até 15 m de comprimento e concavidade de até 10 m. ....	84
Figura 6.6 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools, com os parâmetros escolhidos: simplificação de elementos de até 2 m, limpeza de linhas de até 20 m de comprimento e concavidade de 10 m.....	85
Figura 6.7 - Fluxograma da obtenção do erro utilizando a interpolação em uma TIN.....	87
Figura 6.8 - Conjunto dos pontos LiDAR convertidos em uma TIN .....	88
Figura 6.9 - Histograma dos valores dos erros altimétricos para o lote de amostragem.....	91
Figura 6.10 - Histograma dos valores de $\Delta H$ para o lote de amostragem após a exclusão dos erros grosseiros. ....	93
Figura 6.11 - Fluxograma da obtenção do erro utilizando a metodologia do NDEP. ....	97
Figura 6.12 - Histograma dos valores de $\Delta H$ para o lote de amostragem. ....	103
Figura 6.13 - Histograma dos valores de $\Delta H$ para o lote de amostragem. ....	105
Figura 6.14 - O retângulo equivalente. ....	106
Figura 6.15 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico médio por meio do Método dos Retângulos Equivalentes. ....	107
Figura 6.16 - Polígonos originados pela sobreposição de duas curvas de mesmo valor altimétrico. ....	108
Figura 6.17 - Trecho de uma TIN gerada a partir das curvas de nível da base cartográfica de Campinas. ....	108
Figura 6.18 - Polígonos referentes a uma curva sobrepostos à TIN.....	111
Figura 6.19 - Ilustração para o critério dos valores positivos e negativos dos erros .....	112
Figura 6.20 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico. ....	114
Figura 6.21 - Polígonos criados a partir de curvas de nível consecutivas. ....	115
Figura 6.22 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 680-681.....	118
Figura 6.23 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 681-682.....	118
Figura 6.24 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 682-683.....	119
Figura 6.25 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 683-684.....	119
Figura 6.26 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 684-685.....	120

Figura 6.27 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 685-686.....	120
Figura 6.28 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 686-687.....	121
Figura 6.29 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 687-688.....	121
Figura 6.30 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 688-689.....	122
Figura 6.31 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 689-690.....	122
Figura 6.32 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 690-691.....	123
Figura 6.33 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 691-692.....	123
Figura 6.34 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 692-693.....	124
Figura 6.35 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 693-694.....	124
Figura 6.36 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 694-695.....	125
Figura 6.37 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 695-696.....	125
Figura 6.38 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 696-697.....	126
Figura 6.39 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 697-698.....	126
Figura 6.40 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 698-699.....	127
Figura 6.41 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 699-700.....	127
Figura 6.42 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 700-701.....	128
Figura 6.43 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 701-702.....	128
Figura 6.44 - Estatística descritiva e histograma do $\Delta H$ para o polígono 702-703.....	129
Figura 6.45 - Localização dos pontos levantados em campo sobre a TIN obtida por pontos LiDAR e colorizada de acordo com faixas hipsométricas.....	137
Figura 6.46 - Histograma das discrepâncias entre os valores altimétricos. ....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Padrões de Acurácia Horizontal para Dados Geoespaciais Digitais.....	32
Tabela 3.2 - Padrões de Acurácia Altimétrica para Dados Geoespaciais Digitais. ....	33
Tabela 3.3 - Quantidade recomendada de pontos baseados na área do projeto. ....	34
Tabela 3.4 - Acurácia e espaçamento dos pontos para os três níveis de qualidade do USGS LiDAR. ....	35
Tabela 3.5 - Resumo das normas americanas de padrão de acurácia.....	35
Tabela 3.6 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.....	37
Tabela 3.7 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. ....	37
Tabela 3.8 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais.....	38
Tabela 3.9 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP) para um Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais (CDGV) em grandes escalas. ....	40
Tabela 3.10 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria e altimetria, para cartas topográficas em pequenas escalas. ....	41
Tabela 3.11 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria e altimetria, para cartas topográficas em grandes escalas.....	41
Tabela 4.1 - Comparação da classificação da acurácia entre o NDEP e a ASPRS.....	72
Tabela 6.1 - Tempo de edição das curvas de nível da base cartográfica de Campinas. ....	86
Tabela 6.2 - Lote de amostragem parcial de 25 pontos de verificação.....	89
Tabela 6.3 - Valores da análise estatística.....	90
Tabela 6.4 - Análise visual dos 6 pontos fora do intervalo aceitável.....	92
Tabela 6.5 - Nova análise estatística do lote de amostragem. ....	92
Tabela 6.6 - Amostras para a acurácia altimétrica fundamental em solo nu.....	97
Tabela 6.7 - Amostras para a acurácia altimétrica suplementar em terrenos arbustivos e/ou com árvores baixas.....	99
Tabela 6.8 - Amostras para a acurácia altimétrica suplementar em áreas urbanas. ....	100
Tabela 6.9 - Resumo da acurácia altimétrica seguindo a norma NDEP. ....	101
Tabela 6.10 - Resumo da acurácia altimétrica segundo a norma ASPRS (2014).....	102
Tabela 6.11 - Análise estatística .....	103
Tabela 6.12 - Nova análise estatística .....	104
Tabela 6.13 - Tempo de edição vetorial para geração dos polígonos. ....	109
Tabela 6.14 - Valores de área dos polígonos originados das curvas de nível, do comprimento médio das curvas e do afastamento posicional médio entre elas.....	109
Tabela 6.15 - Estatísticas das diferenças altimétricas para cada curva de nível. ....	113
Tabela 6.16 - Erros grosseiros em cada polígono analisado.....	116
Tabela 6.17 - Resumo da análise estatística. ....	129
Tabela 6.18 - Análise das médias da componente $\Delta H$ .....	130
Tabela 6.19 - Análise das assimetrias da componente $\Delta H$ . ....	131
Tabela 6.20 - Análise das curtoses da componente $\Delta H$ .....	131
Tabela 6.21 - Comparação com o PEC-PCD (parte 1/5).....	132
Tabela 6.22 - Comparação com o PEC-PCD (parte 2/5).....	133
Tabela 6.23 - Comparação com o PEC-PCD (parte 3/5).....	134
Tabela 6.24 - Comparação com o PEC-PCD (parte 4/5).....	134

Tabela 6.25 - Comparação com o PEC-PCD (parte 5/5).....	135
Tabela 6.26 - Pontos levantados em campo e suas discrepâncias altimétricas em relação à TIN.....	138
Tabela 6.27 - Estatística Descritiva do $\Delta h$ .....	139
Tabela 6.28 - Teste de enquadramento nas classes do PEC-PCD.....	140
Tabela 7.1 – Comparação entre os métodos testados.....	142

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>2D</b>	Bidimensional
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>AENOR</b>	<i>Asociación Española de Normalización y Certificación</i>
<b>ASPRS</b>	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
<b>AVC</b>	Acurácia Vertical Consolidada
<b>AVF</b>	Acurácia Vertical Fundamental
<b>AVS</b>	Acurácia Vertical Suplementar
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i>
<b>CCMEO</b>	<i>Canada Centre for Mapping and Earth Observation</i>
<b>CDGV</b>	Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais
<b>CGAL</b>	<i>Computational Geometry Algorithms Library</i>
<b>CONCAR</b>	Comissão Nacional de Cartografia
<b>CQ</b>	Controle de Qualidade
<b>DGPS</b>	<i>Differential Global Positioning System</i>
<b>DWG</b>	Extensão de arquivos de desenho em 2D e 3D nativa do programa AutoCAD
<b>EM</b>	Erro Máximo
<b>EP</b>	Erro Padrão
<b>ET-ADGV</b>	Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
<b>ET-CQDG</b>	Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais
<b>ET-EDGV</b>	Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>EVLRL</b>	<i>Extended Variable Length Records</i>
<b>FGDC</b>	<i>Federal Geographic Data Committee</i>
<b>FW</b>	<i>Full-waveform</i>
<b>GB</b>	<i>Gigabyte</i>
<b>GHz</b>	<i>Gigahertz</i>
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>GSD</b>	<i>Ground Sample Distance</i>
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>IFSAR</b>	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
<b>IG</b>	Informação Geográfica
<b>INS</b>	<i>Inertial Navigation System</i>
<b>INDE</b>	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>K</b>	Valor de curtose

<b>LAS</b>	<i>Laser File Format Exchange Activities</i>
<b>LiDAR</b>	<i>Light Detection and Ranging</i>
<b>LWG</b>	<i>LAS Working Group</i>
<b>MAPGEO</b>	Programa para interpolação da ondulação geoidal desenvolvido pelo IBGE
<b>MB</b>	<i>Megabyte</i>
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevação
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno
<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superfície
<b>MP</b>	Mega pixel
<b>MRE</b>	Método dos Retângulos Equivalentes
<b>NAQ</b>	Nível Aceitável de Qualidade
<b>NIR</b>	<i>Near Infra Red</i> (Infravermelho próximo)
<b>NDEP</b>	<i>National Digital Elevation Program</i>
<b>NMAS</b>	<i>National Map Accuracy Standards</i>
<b>NOAA</b>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<b>NSRS</b>	<i>National Spatial Reference System</i>
<b>NSSDA</b>	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
<b>PAP-PCD</b>	Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais
<b>PEC</b>	Padrão de Exatidão Cartográfica
<b>PEC-PCD</b>	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
<b>Perfil MGB</b>	Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil
<b>RBMC</b>	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
<b>RGB</b>	Bandas do <i>Red, Green, Blue</i>
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i> (Erro médio quadrático)
<b>RTK</b>	<i>Real Time Kinematic</i> (Posicionamento cinemático em tempo real)
<b>As</b>	Valor de assimetria
<b>SIG</b>	Sistema de Informações Geográficas
<b>SIRGAS2000</b>	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, realização no ano de 2000
<b>TIN</b>	<i>Triangulated Irregular Network</i>
<b>UNICAMP</b>	Universidade Estadual de Campinas
<b>UTM</b>	Universal Transversa de Mercator
<b>VLR</b>	<i>Variable Length Records</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Situando o tema na área.....	17
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Objetivos da pesquisa.....	19
1.4	Organização do trabalho.....	19
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	21
2.1	Aspectos gerais dos dados LiDAR.....	21
2.2	A exibição da nuvem de pontos LiDAR.....	24
2.3	Uma propriedade da forma de onda.....	25
3	PADRÕES DE ACURÁCIA.....	29
3.1	A evolução dos padrões de acurácia no exterior.....	30
3.2	A evolução dos padrões de acurácia no Brasil.....	36
3.3	Indicadores estatísticos de acurácia.....	41
4	A ACURÁCIA DOS DADOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DO <i>NATIONAL DIGITAL ELEVATION PROGRAM</i> (NDEP).....	45
4.1	Requisitos da acurácia altimétrica.....	45
4.2	Requisitos da acurácia horizontal.....	48
4.3	Avaliação da acurácia e relatórios.....	49
4.3.1	Considerações gerais.....	49
4.3.2	Planejamento dos testes de acurácia.....	51
4.3.3	Seleção e coleta de pontos de controle.....	52
4.3.4	Obtenção de dados altimétricos para pontos de controle.....	57
4.3.5	Cálculo dos erros.....	59
4.3.6	Análise dos erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios.....	59
4.4	Cálculo e relatório da acurácia altimétrica.....	61
4.4.1	O Percentil 95.....	61
4.4.2	Teste da Acurácia Altimétrica Fundamental.....	62
4.4.3	Teste da Acurácia Altimétrica Suplementar.....	63
4.4.4	Teste da Acurácia Altimétrica Consolidada.....	63
4.4.5	Os requisitos mínimos para a realização do controle altimétrico.....	64
4.4.6	Relatório da acurácia altimétrica de dados não testados.....	66
4.4.7	Testando e declarando a acurácia horizontal.....	66

4.4.8	Resumo da avaliação da acurácia.....	68
4.4.9	A acurácia altimétrica relativa.....	68
4.4.10	As características específicas do terreno num modelo de superfície ....	70
4.5	A classificação da acurácia altimétrica utilizada pela nova norma da ASPRS.....	71
5	A TRIANGULAÇÃO UTILIZADA NOS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	73
5.1	A triangulação 2D.....	73
6	MÉTODOS E EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DE DADOS LiDAR.....	79
6.1	Área de estudo e informações sobre os dados.....	79
6.2	Processamentos para geração das curvas de nível.....	81
6.2.1	Curvas de nível interpoladas a partir dos pontos LiDAR.....	81
6.2.2	Curvas de nível de referência.....	85
6.3	Primeiro método: avaliação do erro altimétrico dos pontos LiDAR pela adaptação da Norma brasileira – uma aplicação prática.....	86
6.4	Segundo método: baseado na metodologia do padrão NDEP – uma aplicação prática.....	96
6.5	Terceiro método: quantificação da discrepância entre curvas de nível – proposta e aplicação.....	105
6.6	Quarto método: avaliação dos erros altimétricos dos pontos LiDAR situados entre curvas de nível consecutivas – proposta e aplicação.....	114
6.7	Método tradicional da norma brasileira – Teste de avaliação da acurácia com pontos de controle levantados em campo.....	137
7	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	141
	REFERÊNCIAS.....	146
	APÊNDICE A – Elementos a considerar no processamento de modelos digitais de elevação a partir de pontos LiDAR.....	156
	APÊNDICE B – Lote de amostragem para o controle altimétrico do LiDAR.....	164
	APÊNDICE C – Análise dos pontos excluídos no método I.....	177
	APÊNDICE D – Proposta de controle de qualidade altimétrico para dados LiDAR.....	182
	APÊNDICE E – Tabelas dos valores de $\Delta H$ entre a TIN e as curvas de nível testadas (Coordenadas UTM, Fuso 23S).....	185
	ANEXO A - Informações do cabeçalho do arquivo LAS.....	201

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho focaliza o controle de qualidade altimétrica dos dados LiDAR, previamente classificados como solo, propondo e avaliando quatro métodos para esse controle, dois deles desenvolvidos pela autora do presente trabalho, e dois outros por ela adaptados.

### 1.1 Situando o tema na área

O LiDAR (acrônimo de *Light Detection And Ranging*) tem sido amplamente utilizado como tecnologia em mapeamentos. Trata-se de um sensor remoto ativo que pode ser empregado a partir de plataformas aéreas e terrestres fixas ou móveis.

O princípio do funcionamento do LiDAR baseia-se na medição de distâncias por meio da obtenção da diferença de tempo entre a emissão de um pulso em direção a uma superfície e a detecção do sinal refletido.

O sensor LiDAR utiliza a região do espectro eletromagnético do infravermelho. Segundo Paula (2017), o pulso LiDAR operante no canal infravermelho não produz sinal de retorno quando interage com corpos d'água livre de cobertura vegetal e, também, de partículas em suspensão, o que o torna propício para certas aplicações hidrológicas. Para aplicação em batimetria, existem sistemas LiDAR que utilizam a região do espectro da luz no verde e no azul (RENSLOW, 2012).

O LiDAR aerotransportado, empregado conjuntamente com a técnica de aerofotogrametria (proveniente tanto do aerolevanteamento digital como do produto RGB do LiDAR), está se firmando como tecnologia dominante de aquisição de dados geoespaciais para a obtenção de Modelos Digitais de Elevação (MDE), Modelos Digitais de Superfície (MDS), ortofotos e produtos derivados, modelos digitais 3D de cidades, e modelos digitais 3D de paisagens (LEMMENS, 2017).

Sua utilização está em forte ascensão em múltiplas aplicações, tais como: monitoramento de florestas, monitoramento e planejamento urbano, gestão de recursos naturais, gestão de desastres naturais, mapeamento de corredores urbanos e ambientais, modelagem hidrológica, e monitoramento do carbono florestal.

Cada pulso refletido passa a fazer parte de um conjunto de pontos com coordenadas E, N e H, referenciadas a um Sistema Geodésico de Referência, graças

à utilização do Sistema de Posicionamento Global por Satélites (GNSS) e do Sistema de Navegação Inercial (INS) durante a varredura. Por outro lado, essa tecnologia tem-se desenvolvido para proporcionar um aumento significativo na densidade e do número de pulsos refletidos, o que permite melhor precisão e melhores estudos, sobretudo na área de vegetação.

Um dos desafios é saber a que tipo de alvo corresponde cada ponto e gravar isso em um arquivo. A *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) criou, então, uma classificação que ajuda a determinar se um ponto corresponde a solo, água, edificação, vegetação baixa, média ou alta, etc (ASPRS, 2019).

Com as informações das coordenadas de cada ponto LiDAR, tornou-se possível avaliar a acurácia altimétrica de forma direta, ou por interpolação, comparando a componente altimétrica de cada ponto com esse mesmo dado em outro produto de referência para a mesma área.

O presente trabalho apresenta inicialmente, por ser menos conhecido, o método para determinar a acurácia altimétrica dos dados de elevação digital, entre eles o LiDAR, do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program – NDEP*, 2004) e a seguir propõe métodos para avaliar a acurácia altimétrica dos dados LiDAR, inspirado na norma brasileira e outros dois desenvolvidos pela autora.

## **1.2 Justificativa**

As normas existentes para realizar a acurácia altimétrica, inclusive para LiDAR, preveem a comparação de coordenadas em certo número de pontos, em geral, 20 por folha (MERCHANT, 1982). Nos levantamentos LiDAR, em que se trabalha com nuvens de milhões de pontos, poderia ser amostrados mais pontos e, portanto efetuar tratamentos automatizados de uma grande quantidade de pontos, coisa que se fez no presente trabalho.

Além disso, o LiDAR está apto para levantar diferentes tipos de cobertura do solo, com certas dificuldades intrínsecas, e parece interessante propor diferentes acurácias para diferentes coberturas como solo nu, vegetação de diversos tipos, área urbanizada, etc. Essa é a proposta de uma norma americana, que foi estudada e aplicada à nossa realidade.

Como a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR é um tema bastante relevante e ainda pouco explorado, justifica-se a presente pesquisa.

### 1.3 Objetivos da pesquisa

Este trabalho tem por objetivo geral estudar dois métodos existentes e propor dois métodos novos para determinar a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR, compará-los entre si e fazer recomendações.

Como objetivos específicos têm-se:

- 1) Detalhar o Guia de procedimentos para aquisição de Dados de Elevação Digital (*Guidelines for Digital Elevation Data*) do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program – NDEP*), que também foi utilizado pela ASPRS até 2014, quando esta publicou uma norma mais abrangente.
- 2) Comparar as curvas de nível geradas pelos pontos LiDAR com um produto de referência.
- 3) Analisar a estatística descritiva da discrepância altimétrica dos métodos estudados.
- 4) Analisar discrepâncias que se mostraram localizadas.
- 5) Comparar os métodos e sugerir diretrizes para sua utilização.

### 1.4 Organização do trabalho

O Capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta conceitos gerais, como, o formato dos dados LiDAR, os diferentes mecanismos de varredura, a visualização dos pontos em canais RGB e valor de intensidade, e a propriedade de forma de onda completa (*full waveform*).

O Capítulo 3 apresenta o histórico dos padrões de acurácia cartográfica.

O Capítulo 4 trata da avaliação da acurácia altimétrica, detalhando minuciosamente o Guia de procedimentos para aquisição de Dados de Elevação Digital do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos, por ser pouco conhecido entre nós e por ser um dos métodos a ser aplicado à nossa realidade e comparado com os demais.

O Capítulo 5 apresenta a fundamentação teórica das triangulações 2D porque o processamento LiDAR é realizado por meio de algoritmos de triangulação.

O Capítulo 6 apresenta o desenvolvimento metodológico da avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR, com a proposição dos 4 métodos e sua comparação.

O Capítulo 7 trata dos resultados e conclusões do trabalho.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesse capítulo são apresentados conceitos gerais sobre o LiDAR.

### 2.1 Aspectos gerais dos dados LiDAR

Os dados LiDAR são disponibilizados, geralmente, em três formatos (RENSLOW, 2012):

1. Dados brutos de distância ou tempo (*proprietary range / timing data*). Nos sistemas baseados em pulsos, ou modo linear, a distância (entre a fonte emissora e o ponto de reflexão) é calculada pela diferença do tempo entre a emissão do pulso e o seu retorno ao sensor, multiplicada pela velocidade da luz. Nos sistemas baseados na fase, a distância é medida por interferometria, isto é, utilizando a fase de um pulso LiDAR modulado para calcular a distância como uma fração do comprimento de onda do sinal modulado.
2. Formato da nuvem de pontos (*point cloud format*). Uma nuvem de pontos, no presente contexto, é um conjunto de dados em um formato estabelecido, referida a um sistema de coordenadas.
3. Formato híbrido como nuvem de pontos e pacote de ondas (*point cloud / wave packet hybrid data*). Um pacote de ondas é uma estrutura que armazena o deslocamento de um conjunto de ondas sinusoidais. A propriedade do pacote de ondas é mais bem detalhada na seção 2.3.

A nuvem de pontos LiDAR não tem uma organização geométrica regular. Isso pode ocorrer devido a três causas: pelo processo de aquisição (mecanismos de varredura), pela atitude da aeronave (durante a varredura), e pela irregularidade do relevo.

A figura 2.1 mostra os diferentes mecanismos de varredura utilizados tanto nas plataformas aéreas como terrestres do LiDAR (VOSSELMAN; MAAS, 2010), e que são as seguintes:

1. *Mecanismo do espelho oscilante*: é utilizado um espelho giratório que direciona o pulso LiDAR através da faixa de varredura. Os pontos são gerados em ambas as direções da varredura, resultando em um padrão de zigzag no solo. A distância dos pontos LiDAR dentro de uma linha de varredura varia porque o espelho está constantemente acelerando e desacelerando: distâncias maiores

entre os pontos são encontradas no meio da faixa, já distâncias menores se encontram nas extremidades, posição em que a direção de varredura do espelho muda de sentido. Na maioria das aplicações, escolhe-se uma densidade pontual homogênea na direção e na perpendicular ao trajeto, com algumas variações causadas pelo padrão de ziguezague, pelo movimento não linear do espelho e pelo relevo. Em geral, os sistemas de espelhos oscilantes funcionam de 100 m a 6000 m acima do solo.

2. *Mecanismo do espelho poligonal giratório*: é utilizado um espelho poliédrico rotativo para a deflexão do feixe. Os pontos são gerados em apenas uma direção de varredura. As linhas de varredura são paralelas e, em comparação com os sistemas de espelhos oscilantes, o padrão de medição mostra uma distribuição mais uniforme dos pontos no solo. O escâner pode até ser configurado para produzir pontos LiDAR igualmente espaçados nas duas direções. Os sistemas com técnicas de espelho giratório proporcionam ângulos de varredura entre cerca de 30° e 60°.
3. *Escâner Palmer*: O dispositivo de espelho que desvia o feixe é construído de tal modo que a superfície do espelho e o eixo de rotação formam um ângulo que não é igual a 90°. Os sistemas baseados na varredura Palmer são usados principalmente em escâneres terrestres. No caso dos sistemas aerotransportados, o padrão resultante no solo é elíptico. Devido ao mecanismo de varredura, os objetos podem ser iluminados duas vezes (uma vez na varredura para frente e novamente na varredura para trás), reduzindo áreas de sombras (sem dados) nos dados de altimetria em sistemas aéreos.
4. *Escâner de fibra de vidro*: pulsos individuais são fornecidos sequencialmente para um sistema de fibras de vidro, dispostas linearmente, por um espelho de varredura. A vantagem desta tecnologia é que o mecanismo de varredura é extremamente estável porque as fibras de vidro são unidas rigidamente durante o processo de fabricação. O ângulo de varredura também é fixado na fabricação. Uma configuração típica desse mecanismo proporciona 128 fibras de vidro e um ângulo de varredura de 14°. Esta configuração normalmente produz espaçamentos diferentes entre os pontos LiDAR ao longo do trajeto.

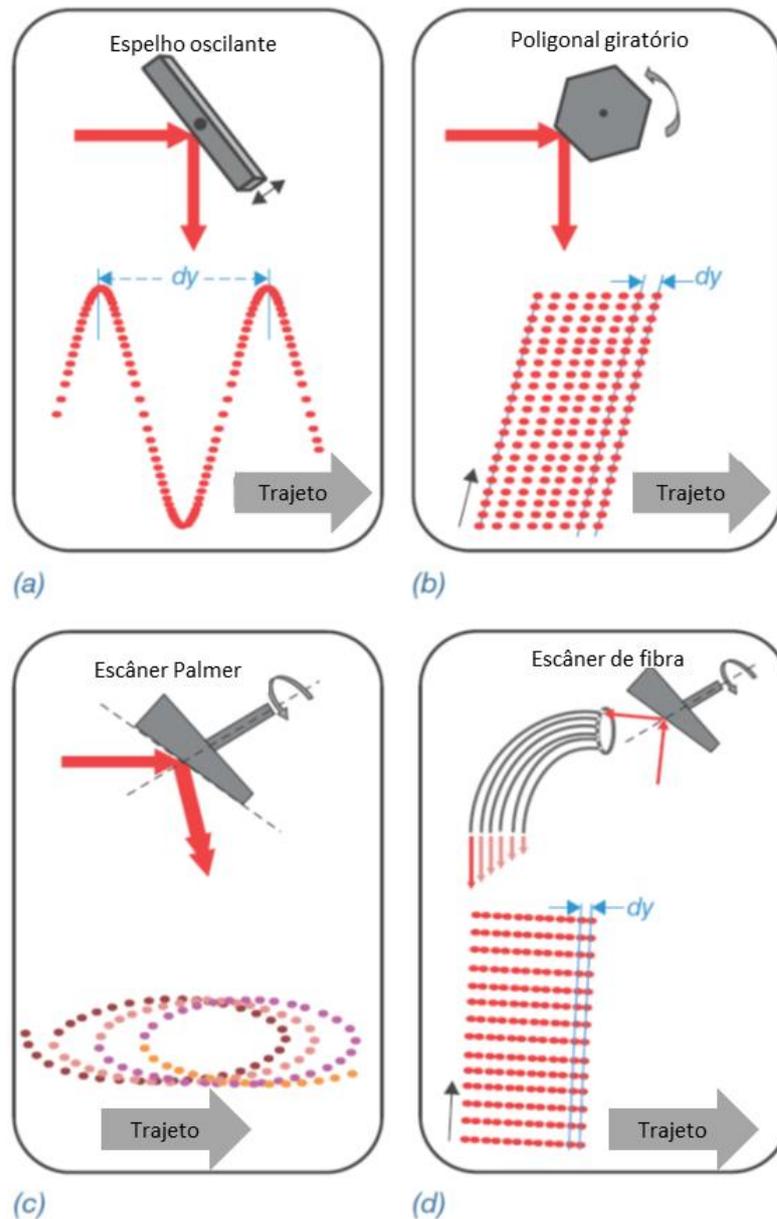


Figura 2.1 - Mecanismos de varredura LiDAR  
 (a) Espelho oscilante, (b) Espelho poligonal giratório, (c) Escâner Palmer, (d) Escâner de fibra de vidro. Fonte: Adaptado de Vosselman; Maas (2010).

O processamento dos dados LiDAR se tornaria uma tarefa muito difícil se os pontos não fossem separados em blocos menores. Por isso, é comum no início do processamento separar os dados brutos LiDAR em blocos a fim de agilizar a tarefa do processamento.

## 2.2 A exibição da nuvem de pontos LiDAR

Os pontos LiDAR podem ser exibidos de três formas: baseados no número de retornos (*Return – based*), baseados no sistema de cores RGB (*RGB – based*), ou baseados na Intensidade (*Intensity – based*), como se pode ver em *DTMaster Reference Manual* (2010).

O número de retornos é uma medida de quantas vezes um único feixe é refletido durante a penetração (no meio de galhos e folhas de árvores, por exemplo) até que atinja o chão.

Há canais destinados ao armazenamento de valores (níveis digitais) de coloração dos pontos por um ou mais sensores ópticos auxiliares. A exibição baseada em RGB e infravermelho próximo (NIR) são formas de exibir pontos LiDAR com informações adicionais de cor, de forma análoga ao que ocorre em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

Esse dado é normalizado para 16 bits (que corresponde a  $2^{16} = 65.536$ ) por meio da divisão do número 65.536 pela faixa dinâmica da intensidade do sensor, resultando num valor positivo. Se a faixa dinâmica da intensidade do sensor for 10 bits, então o valor de escala será  $65.536/1.024$ , ou seja,  $2^{16}/2^{10}$ . Essa normalização é necessária para garantir que os dados provenientes de sensores diferentes possam ser unidos corretamente. Se a intensidade e/ou os dados de cor não estiverem disponíveis ou não forem levantados, esses valores devem ser definidos como “zero” na matriz (RENSLOW, 2012).

O valor de intensidade é uma medida da intensidade do sinal de retorno. Ele mede a amplitude do pico de pulsos de retorno que são refletidos a partir do alvo para o detector do sistema LiDAR. A intensidade é coerente entre objetos semelhantes, o que torna possível mapear as informações sob a forma de uma matriz, com a aparência de uma imagem em tons ou níveis de cinza. Apesar de ser opcional e específico de cada sistema, se disponível, deve ser sempre incluído conforme a recomendação do *DTMaster Reference Manual* (2010).

### 2.3 Uma propriedade da forma de onda

A forma de onda, que é causada pela refração atmosférica, é uma representação digitalizada (como um conjunto de ondas sinusoidais) da intensidade do retorno de um pulso LiDAR no tempo (RENSLOW, 2012).

A intensidade do sinal de retorno LiDAR dependem do tipo e da orientação da superfície iluminada (VOSSSELMAN; MAAS, 2010).

A figura 2.2 mostra a localização do pulso de retorno (pulso no eixo P), tal como é gerado pelo receptor de um sistema de medição de tempo de retorno/voo (time-of-flight) em três casos diferentes em que um pulso LiDAR ilumina objetos na superfície, a saber: (a) sobre o solo; (b) sobre o telhado de uma casa; e (c) com um pulso de retorno sobre o telhado e outro pulso de retorno sobre o solo.

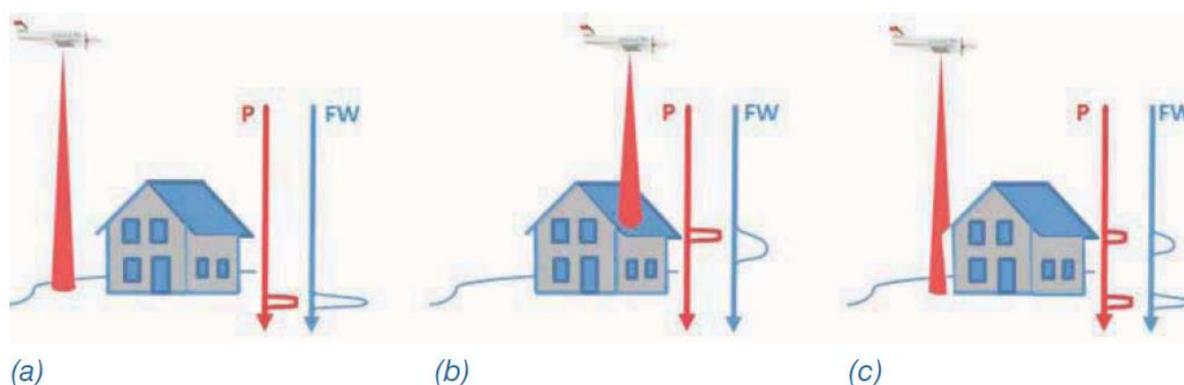


Figura 2.2 - Ilustração do pulso de retorno discreto (eixo P) e da digitalização da forma de onda (eixo FW) em três casos: (a) sobre o solo; (b) sobre o telhado de uma casa; e (c) com um pulso de retorno sobre o telhado e outro pulso de retorno sobre o solo.

Fonte: Vosselman; Maas (2010).

Um receptor de *time-of-flight* fornece apenas um sinal que marca a parte final da transmissão num certo tempo de retorno do pulso. Esses sistemas também são chamados de sistemas de pulso discreto. O pulso discreto não fornece informações sobre a forma de onda do pulso. Em contrapartida, o registro da forma completa da onda (*full waveform*) permite a análise da forma completa do pulso por meio da digitalização do pulso de retorno. A propriedade da forma completa da onda é útil porque fornece características detalhadas dos objetos verticais, como torres, postes,

antenas e, também, possibilita diferenciar espécies de árvores e estimativas de volume florestal (PAULA, 2017).

A nuvem de pontos LiDAR normalmente é armazenada num arquivo padrão LAS. O armazenamento do dado em forma de onda (*waveform*, em inglês) foi possível a partir do arquivo LAS na versão 1.3 e posteriores.

O documento intitulado “*LAS Specification, version 1.4 – R.14*” (2019), produzido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, fornece a definição do formato LAS, sua compatibilidade, a representação do sistema de referência de coordenadas, os padrões para o armazenamento dos dados, as informações do cabeçalho do arquivo, os registros de tamanhos variáveis (*VLRs - Variable Length Records*), os formatos de registros de dados de pontos, os registros de tamanhos variáveis estendidos (*EVLRs - Extended Variable Length Records*), e os descritores do pacote de forma de onda<sup>1</sup> (*Waveform Packet*). Isso pode ser visto no Anexo A.

Os registros de tamanhos variáveis (*VLRs*) contêm tipos de dados variados, incluindo informações de projeção, metadados, informações de pacotes de forma de onda e dados para aplicações do usuário. Eles são limitados a uma carga de transmissão total de dados de 65.535 bytes. Os registros de tamanhos variáveis estendidos (*EVLRs*) permitem uma carga de transmissão de dados maior do que os *VLRs* e têm a vantagem de poderem ser anexados ao final de um arquivo LAS. Isso permite adicionar, por exemplo, informações de projeção a um arquivo LAS sem ter que reescrever todo o arquivo.

Conforme o *LAS Specification* (ASPRS, 2019), os formatos dos registros dos dados de pontos são classificados de 0 a 10, sendo que os que contêm o pacote de forma de onda são os formatos 4, 5, 9 e 10.

Um arquivo LAS contendo os tipos de pontos gravados 4, 5, 9 ou 10 poderia conter um bloco de pacote de forma de onda armazenado com a carga de transmissão de um registro *EVLR*. Ao contrário dos outros *EVLRs*, os pacotes de forma de onda (se armazenados internamente no arquivo) são deslocados para o cabeçalho do arquivo aparecendo como "Início do Registro do Pacote de Dados de Forma de Onda".

Para que o dado LiDAR possa ser usado tanto no modo discreto como no modo de forma de onda, cada pacote de forma de onda é atribuído para, pelo menos, um

---

<sup>1</sup> “Pacote de forma de onda” é uma região do espaço onde ondas de diferentes comprimentos se sobrepõem.

ponto. Essa configuração possibilita o funcionamento do programa de processamento de dados LiDAR que tenha sido projetado para processar somente retornos discretos.

Ferreira (2014) apresentou a definição dos três sinalizadores (“sintético”, “ponto-chave” e “retido”) que têm a finalidade de acrescentar alguma informação relevante durante a classificação dos dados LiDAR. O sinal de retorno LiDAR sinalizado como sintético é um ponto proveniente de outra fonte, como por exemplo, obtido por modelo fotogramétrico. O retorno sinalizado como ponto-chave é um ponto considerado como fundamental no modelo e não deve ser retirado por nenhum algoritmo de filtragem. O retorno sinalizado como retido é um ponto que não deve ser incluído no processamento.

Sob o aspecto da codificação do dado de forma de onda, um pulso de retorno pode:

- a) Não apontar para um pacote de forma de onda;
- b) Ser o único ponto dentro de uma forma de onda;
- c) Apontar para um ou mais retornos dentro de uma forma de onda.

No pós-processamento, os dados de forma de onda sem retorno podem ser codificados posteriormente como retornos sintéticos.

Os registros dos descritores do pacote de ondas contêm informações que descrevem a configuração do pacote de forma de onda. Como os processos podem ser configurados de forma diferente em momentos diferentes ao longo de um trabalho, o arquivo LAS suporta 255 descritores de pacotes de forma de onda (ASPRS, 2019).

Os descritores de pacotes de ondas contêm os seguintes campos:

- a) Bits por amostra: são suportados de 2 a 32 bits.
- b) Tipo de compressão da forma de onda: os tipos de compressão padrão serão adotados pela comissão LAS da ASPRS no futuro. Este campo indicará o algoritmo de compressão utilizado para os pacotes de forma de onda associados a este descritor. O valor zero indica nenhuma compressão. Atualmente o único valor suportado é zero.
- c) Número de amostras: é o número de amostras associadas a este tipo de pacote de forma de onda. Esse valor sempre representa o pacote de forma de onda totalmente descompactado.
- d) Espaçamento da amostra temporal: o espaçamento temporal da amostra em picossegundos. Os valores de amostra podem ser 500, 1000, 2000 e assim por

diante, representando as frequências de um digitalizador de 2 GHz, 1 GHz e 500 MHz respectivamente.

- e) Aumento do digitalizador / Deslocamento do digitalizador: o aumento e o deslocamento (compensação) são usados para converter o valor bruto digitalizado em uma voltagem absoluta do digitalizador pela fórmula (1):

$$\text{Volt.} = \text{Dslc.} + \text{Aum.} \times \text{Ampl.} \quad (1)$$

Onde:

Volt. = Voltagem

Dslc. = Deslocamento

Aum. = Aumento

Ampl. = *Amplitude bruta da forma de onda*

Cada ponto que estiver indexado a um pacote de forma de onda inclui coeficientes de primeira ordem para “se deslocar na onda”. Isso permite mudar a localização de um ponto indexado usando uma aproximação de primeira ordem.

Essa operação consiste em analisar um pacote de onda para o local onde se gostaria de indexar um retorno, e deslocar o padrão de retorno do sensor, como por exemplo, indexar a grama alta para o primeiro aumento em amplitude.

Calculam-se os valores da coordenada para o novo retorno começando pelo retorno mais próximo do sensor no pacote de ondas, usando os coeficientes  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  de primeira ordem para posicionar o novo retorno. Por fim, esse novo retorno é codificado como sintético (ASPRS, 2019).

Informações complementares sobre conceitos gerais do sistema LiDAR encontram-se em Baltsavias (1999), Werh e Lohr (1999), Shan e Toth (2008), Renslow (2012) e USACE (2015).

### 3 PADRÕES DE ACURÁCIA

O termo acurácia é frequentemente confundido com o significado de precisão. A precisão é uma medida de dispersão de um conjunto de valores em torno de um determinado valor desse conjunto, denominado média. A precisão pode ser considerada como uma medida de consistência ou diferença entre medidas repetidas, embora possa ser sistematicamente incorreta. A medida usual da precisão é o desvio padrão ou o erro padrão (Mônico et al., 2009).

Já a acurácia é uma medida de tendência em torno do valor padrão ou de referência. Um sistema preciso, como por exemplo o GNSS, pode sistematicamente produzir medições tendenciosas devido à correção troposférica e ao uso de estações de base que não sejam de referência (Mônico et al., 2009).

Os conceitos de normatização e qualidade estão diretamente relacionados. Em função dessa interligação, Garcia-Balboa (2011), afirma ser natural que ao se desenvolver um grupo de normas para um determinado setor se inclua documentos relativos a qualidade. Para Robinson et al. (1995), as normas são essenciais para o controle de qualidade na cartografia.

Nero e Cintra (2005) realizaram um estudo sobre padrões de controle de qualidade em mais de 60 países e instituições que mostrou que todos eles consideram o mapeamento como um conjunto de cartas e, mais particularmente, os métodos focam no controle de uma carta; este método pode ser repetido em outros estudos. Assim, o controle de qualidade de um mapeamento representa ou significa o controle de qualidade de uma ou mais cartas.

Xavier et al. (2015) enfatiza a necessidade de atualizações das normas relativas à qualidade de dados geoespaciais requeridas pelos avanços recentes nas ciências da geoinformação.

A acurácia altimétrica ou vertical é a discrepância entre o valor de altimetria estimado pelo produto, comparada com um valor padrão ou considerado mais preciso ou acurado. A acurácia é comumente referida como alta ou baixa dependendo da medida das diferenças, segundo um valor de corte arbitrado.

### 3.1 A evolução dos padrões de acurácia no exterior

Em 1947, foi publicada a primeira norma nos Estados Unidos que tratava de padrões de acurácia horizontal e vertical para mapas publicados, intitulada *United States National Map Accuracy Standards* (NMAS, 1947).

Em 1998, o *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA, 1998), publicado pelo *Federal Geographic Data Committee* (FGDC), vinculou a acurácia a um valor definido na escala do solo, assumindo que todos os erros seguem uma distribuição normal de erro, mas o NSSDA não definiu valores específicos de acurácia como fez o *National Map Accuracy Standards* (NMAS, 1947).

Em 2004, as Diretrizes para Dados Digitais de Elevação foram publicadas pelo *National Digital Elevation Program* (NDEP, 2004), e as Diretrizes da ASPRS *Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data* foram publicadas pela ASPRS (ASPRS, 2004). Ambas utilizaram as diretrizes da NSSDA como base, não sendo definidos valores específicos de acurácia, mas forneceriam métodos alternativos para realizar testes de acurácia dos dados LiDAR, onde os erros não seguem, necessariamente, uma distribuição normal de erro, como é comum para o caso do terreno com vegetação.

Em 2009, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2009) publicou uma norma para o uso do LiDAR no mapeamento costeiro e na definição de limites territoriais marinhos dos Estados Unidos.

Em 2010, o *US Geological Survey* (USGS) publicou o documento *Lidar Guidelines and Base Specifications*, V.13, adotado pelo Memorando de Procedimentos Nº 61 da *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), *Standards for Lidar and Other High Quality Digital Topography* (FEMA, 2010). Mas, a FEMA também estabeleceu múltiplos valores de acurácia altimétrica de valores mais baixos do que os valores mínimos do USGS.

Em 2012, a USGS publicou o documento *Lidar Base Specification*, versão 1.0, (Heidemann, 2012), e em 2014, a USGS atualizou esses padrões com a versão 1.2 (Heidemann, 2014).

Em 2014, a ASPRS publicou o documento *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014) que forneceu valores de acurácia horizontal e altimétrica para ortofotos digitais, mapeamento fotogramétrico e LiDAR, incluindo novos padrões LiDAR para a acurácia altimétrica de área sem vegetação (*Non-vegetated Vertical Accuracy - NVA*) e a acurácia altimétrica de área com vegetação

(*Vegetated Vertical Accuracy -VVA*). Este documento substituiu o *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps* (ASPRS, 1990) que se tornou obsoleto por se referir apenas a mapas com escala fixa e intervalos limitados de curvas de nível.

Em 2015, o *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) publicou um manual que fornece diretrizes, padrões de acurácia, especificações técnicas e critérios de controle de qualidade para a execução de mapeamentos aerofotogramétricos e de LiDAR. Com os produtos cartográficos digitais, onde as escalas e os intervalos de curvas de nível podem ser facilmente alterados por ferramentas computacionais, mas sem melhorar a acurácia, foram criados novos padrões de acurácia (USACE, 2015).

Exceto pelo acréscimo de tabelas com unidades inglesas, o *USACE Accuracy Standards for Photogrammetry and LiDAR Mapping* é idêntico ao *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014). Neste documento, também são fornecidas tabelas para comparar os valores de acurácia com utilizações específicas do USACE.

Alinhado com a ASPRS, o USACE definiu novos padrões de acurácia horizontal de mapa para ortomagens digitais, independentemente do tamanho do pixel, que incluem três níveis de padrão: (1) para trabalho que exigem maior acurácia; (2) para mapeamento padrão e trabalho com GIS; e (3) para visualização e trabalho que exija uma acurácia menor.

Se os dados geoespaciais digitais forem ortofotos, dados planimétricos ou dados de altimetria, a classe de acurácia horizontal será baseada no erro médio quadrático  $RMSE_x$ ,  $RMSE_y$  e/ou  $RMSE_r$ , tabela 3.1, e a classe de acurácia altimétrica será baseada no  $RMSE_z$ , tabela 3.2. Embora as tabelas da ASPRS utilizem grandezas do sistema internacional, as unidades inglesas são igualmente aplicáveis.

Tabela 3.1- Padrões de Acurácia Horizontal para Dados Geoespaciais Digitais.

Classes de Acurácia Horizontal	Acurácia Absoluta			Medidas de Acurácia Relativa
	RMSE <sub>x</sub> e RMSE <sub>y</sub> (cm)	RMSE <sub>r</sub> (cm)	Acurácia Horizontal ao nível de confiança de 95% (cm)	Discrepância da linha de ligação num Mosaico (cm)
X cm	≤ X	≤ 1,414*X	≤ 2,448*X	≤ 2*X
0,63 cm	0,63	0,90	1,50	1,30
1,25 cm	1,25	1,80	3,10	2,50
2,50 cm	2,50	3,50	6,10	5,00
5,00 cm	5,00	7,10	12,20	10,00
7,50 cm	7,50	10,60	18,40	15,00
10,00 cm	10,00	14,10	24,50	20,00
12,50 cm	12,50	17,70	30,60	25,00
15,00 cm	15,00	21,20	36,70	30,00
17,50 cm	17,50	24,70	42,80	35,00
20,00 cm	20,00	28,30	49,00	40,00
22,50 cm	22,50	31,80	55,10	45,00
25,00 cm	25,00	35,40	61,20	50,00
27,50 cm	27,50	38,90	67,30	55,00
30,00 cm	30,00	42,40	73,40	60,00
45,00 cm	45,00	63,60	110,10	90,00
60,00 cm	60,00	84,90	146,90	120,00
75,00 cm	75,00	106,10	183,60	150,00
100,00 cm	100,00	141,40	244,80	200,00
150,00 cm	150,00	212,10	367,20	300,00
200,00 cm	200,00	282,80	489,50	400,00
250,00 cm	250,00	353,60	611,90	500,00
300,00 cm	300,00	424,30	734,30	600,00
500,00 cm	500,00	707,10	1223,90	1000,00
1000,00 cm	1000,00	1414,20	2447,70	2000,00

Fonte: ASPRS (2014).

Tabela 3.2 - Padrões de Acurácia Altimétrica para Dados Geoespaciais Digitais.

Classes de Acurácia Altimétrica	Acurácia Absoluta			Acurácia Relativa (onde aplicável)		
	RMSE <sub>z</sub> Área sem vegetação (cm)	NVA ao nível de confiança de 95% (cm)	VVA ao percentil 95 (cm)	Repetibilidade da superfície sólida dentro da faixa (Máx Dif) (cm)	Terreno sem vegetação - faixa para faixa (RMSD <sub>z</sub> ) <sup>2</sup> (cm)	Terreno sem vegetação - faixa para faixa (Máx Dif) (cm)
X cm	≤ X	≤ 1,96*X	≤ 3*X	≤ 0,6*X	≤ 0,8*X	≤ 1,6*X
1 cm	1,0	2,0	3,0	0,6	0,8	1,6
2,5 cm	2,5	4,9	7,5	1,5	2,0	4,0
5 cm	5,0	9,8	15,0	3,0	4,0	8,0
10 cm	10,0	19,6	30,0	6,0	8,0	16,0
15 cm	15,0	29,4	45,0	9,0	12,0	24,0
20 cm	20,0	39,2	60,0	12,0	16,0	32,0
33,3 cm	33,3	65,3	100,0	20,0	26,7	53,3
66,7 cm	66,7	130,7	200,0	40,0	53,3	106,7
100 cm	100,0	196,0	300,0	60,0	80,0	160,0
333,3 cm	333,3	653,3	1000,0	200,0	266,7	533,3

Fonte: ASPRS (2014).

A tabela 3.3 apresenta a quantidade de pontos de controle, considerando a área do projeto, necessários para realizar os testes de acurácia horizontal em ortomagens e dados planimétricos, e a acurácia altimétrica e horizontal em conjuntos de dados de altimetria segundo a ASPRS (2014).

<sup>2</sup> Erro médio quadrático da diferença em z.

Tabela 3.3 - Quantidade recomendada de pontos de controle baseados na área do projeto.

Área do Projeto (Km <sup>2</sup> )	Teste de Acurácia Horizontal de Ortoimagens e Planimetria	Teste de Acurácia Altimétrica e Horizontal para Conjuntos de Dados de Altimetria		
	Número total de pontos de controle estáticos 2D / 3D (pontos claramente definidos)	Número de pontos de controle 3D estáticos no NVA <sup>3</sup>	Número de pontos de controle 3D estáticos no VVA <sup>4</sup>	Número total de pontos de controle 3D estáticos
≤ 500	20	20	5	25
501-750	25	20	10	30
751-1000	30	25	15	40
1001-1250	35	30	20	50
1251-1500	40	35	25	60
1501-1750	45	40	30	70
1751-2000	50	45	35	80
2001-2250	55	50	40	90
2251-2500	60	55	45	100

Fonte: ASPRS (2014).

Os dados LiDAR são normalmente compilados para atender a uma acurácia horizontal de 1 metro de erro médio quadrático (RMSE), e testados para satisfazer a acurácia altimétrica do terreno sem vegetação (NVA) e a acurácia altimétrica do terreno com vegetação (VVA), dependendo do Nível de Qualidade<sup>5</sup> (QL) escolhido (HEIDEMANN, 2014). A tabela 3.4 apresenta esses valores como uma função do nível de qualidade selecionado, conforme a *USGS Lidar Base Specification* versão 1.2. O VVA é testado usando o percentil 95<sup>6</sup> para todas as categorias de cobertura de solo com vegetação.

<sup>3</sup> *Non-vegetated Vertical Accuracy*

<sup>4</sup> *Vegetated Vertical Accuracy*

<sup>5</sup> Em *LiDAR Base Specification*, versão 1.2 há quatro níveis de qualidade para dados de elevação: QL0 (RMSE<sub>z</sub> de 5 cm e 8 pulsos/m<sup>2</sup>); QL1 (RMSE<sub>z</sub> de 10 cm e 8 pulsos/m<sup>2</sup> – classe híbrida entre QL0 e QL2); QL2 (RMSE<sub>z</sub> de 10 cm e 2 pulsos/m<sup>2</sup>); e QL3 (RMSE<sub>z</sub> de 20 cm e 0,5 pulso/m<sup>2</sup>).

<sup>6</sup> O percentil 95 é uma função estatística. Ele indica que, num conjunto de dados, 95% dos erros têm valores absolutos que são iguais ou inferiores a um valor especificado.

Tabela 3.4 - Acurácia e espaçamento dos pontos para os três níveis de qualidade do USGS LiDAR.

Nível de Qualidade	RMSEz em terreno sem vegetação	Acurácia Altimétrica em terreno sem vegetação (NVA)	Acurácia Altimétrica em terreno com vegetação (VVA)	Espaçamento nominal do pulso LiDAR (NPS)	Densidade nominal do pulso LiDAR (NPD)
QL1	10 cm	19,6 cm	30 cm	0,35 m	8 pontos/m <sup>2</sup>
QL2	10 cm	19,6 cm	30 cm	0,71 m	2 pontos /m <sup>2</sup>
QL3	20 cm	39,2 cm	60 cm	1,41 m	0,5 ponto/m <sup>2</sup>

Fonte: Heidemann (2014).

Os dados LiDAR são geralmente testados (confrontados) com uma TIN criada pelos pontos levantados em solo nu, para interpolação, pois é pouco provável que um ponto LiDAR discreto esteja localizado na mesma posição (x,y) que os pontos de controle do levantamento.

A tabela 3.5 mostra um resumo das normas de acurácia e suas principais características.

Tabela 3.5 - Resumo das normas americanas de padrão de acurácia.

Ano	Documento	Instituição	Principais características das normas de padrão de acurácia
1947	<i>United States National Map Accuracy Standards</i>	NMAS	Primeira norma que tratou de padrões de acurácia horizontal e vertical para mapas publicados.
1998	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>	NSSDA	Assumia que todos os erros seguiam uma distribuição normal.
2004	<i>National Digital Elevation Program</i>	NDEP	Forneceu métodos alternativos para realizar testes de acurácia altimétrica, onde os erros não seguiam, necessariamente, uma distribuição normal.
2004	<i>Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data</i>	ASPRS	Forneceu especificações técnicas para a execução de mapeamento com o LiDAR.
2010	<i>Lidar Guidelines and Base Specifications</i>	USGS	Estabeleceu múltiplos valores de acurácia altimétrica.
2012	<i>Lidar Base Specification, v. 1.0</i>	USGS	Forneceu especificações técnicas para a execução de mapeamento com o LiDAR.
2014	<i>Lidar Base Specification, v. 1.2</i>	USGS	Forneceu valores de acurácia horizontal e altimétrica, incluindo o NVA e o VVA.
2014	<i>Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data</i>	ASPRS	Forneceu valores de acurácia horizontal e altimétrica, incluindo o NVA e o VVA.
2015	<i>Accuracy Standards for Photogrammetry and LiDAR Mapping</i>	USACE	É Idêntico à norma ASPRS (2014), exceto pelo acréscimo de tabelas com unidades inglesas.

Fonte: Elaborado pela autora.

A *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR) está trabalhando em um novo padrão de controle posicional denominado UNE 148002 (AENOR, 2016).

Em 2017, o *Canada Centre for Mapping and Earth Observation* (CCMEO) publicou um documento intitulado *Federal Airborne LiDAR Data Acquisition Guideline*. Este documento fornece especificações técnicas que têm a finalidade de garantir boa

consistência na aquisição dos dados LiDAR, tanto para os levantamentos realizados no Canadá como os realizados em regiões fronteiriças aos Estados Unidos.

Lohani et al. (2018) fizeram uma revisão dos padrões existentes para dados LiDAR e elaboraram um catálogo dos requisitos técnicos necessários num projeto, incluindo aquisição dos dados, parâmetros de controle de qualidade, processamento e formato de entrega dos dados.

Para finalizar esta seção de atualização sobre os padrões de acurácia no exterior, verifica-se pela bibliografia consultada que vários grupos de trabalho, em várias partes do mundo, estão trabalhando na elaboração de documentos técnicos sobre a aquisição, o processamento, a acurácia e o formato de entrega dos dados LiDAR.

### **3.2 A evolução dos padrões de acurácia no Brasil**

No Brasil, as diretrizes e bases das atividades cartográficas foram estabelecidas pelo Decreto-Lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967 (Brasil, 1967).

Em 1984, foi instituído o Decreto nº 89.817 que estabeleceu as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira. O Artigo 8º deste Decreto especificou que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) seria um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que definiria a exatidão dos trabalhos cartográficos (Brasil, 1984).

Em decorrência dos métodos e tecnologias disponíveis àquela época, este Decreto não previa um número mínimo de pontos de verificação necessários à comprovação da acurácia dos documentos cartográficos.

Em 2008, foi instituída a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) pelo Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008 (Brasil, 2008).

O surgimento de novas geotecnologias contribuiu para que fosse realizada uma revisão dos padrões determinados pelo Decreto nº 89.817 resultando no desenvolvimento de uma nova norma (em conformidade com o Plano de Ação da INDE) denominada Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), publicada no ano de 2010 (CONCAR/DSG, 2011).

A ET-ADGV, então, estabeleceu um novo Padrão de Exatidão Cartográfica destinado a atender os Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

O enquadramento das classes no PEC-PCD (tabelas 3.6 a 3.8) baseia-se nas estatísticas de 90% dos pontos levantados no produto cartográfico em relação às coordenadas dos pontos homólogos levantados na fonte de maior precisão. Para que sejam enquadrados nas classes do PEC-PCD, as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos homólogos devem resultar em valores iguais ou inferiores de erro máximo (EM) e de erro padrão (EP) previstos para cada produto, para 90% dos pontos examinados.

Tabela 3.6 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC <sup>(1)</sup>	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC	EP <sup>(3)</sup>	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-	A <sup>(2)</sup>	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B <sup>(1)</sup>	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C <sup>(1)</sup>	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D <sup>(1)</sup>	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Fonte: CONCAR – ET-ADGV (2011).

Tabela 3.7 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

PEC-PCD <sup>(4)</sup>	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC	EP <sup>(3)</sup>	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: CONCAR – ET-ADGV (2011).

Tabela 3.8 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC <sup>(1)</sup>	PEC-PCD	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10 m)		1:50.000 (Eqd = 20 m)		1:100.000 (Eqd = 50 m)		1:250.000 (Eqd = 100 m)	
		PEC	EP <sup>(3)</sup>	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00
	D <sup>(5)</sup>	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00	50,00	30,00	100,00	60,00

Fonte: CONCAR – ET-ADGV (2011).

Observações:

- (1) Valores determinados, ou adaptados, com base nos valores do PEC Planimétrico previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984, que se baseia no padrão americano NMAS (1947) e em Merchant (1982).
- (2) Produtos Cartográficos Digitais, baseado nos valores utilizados pelo “Ordnance Survey” e “National Joint Utilities Group” do Reino Unido, extraídos de ARIZA (2002, pág. 87, no qual Exatidão Cartográfica = 0,28 mm na escala do produto cartográfico e EP = 0,17 mm na escala do produto cartográfico).
- (3) No Decreto nº 89.817 (Brasil, 1984), o Erro Padrão equivale ao Desvio Padrão e ao Erro Médio Quadrático. Estatisticamente, estes termos têm conceitos diferentes.
- (4) Valor calculado levando-se em consideração os erros existentes nos processos de medição de pontos de apoio e de fototriangulação.
- (5) Valores do PEC-PCD iguais a 1 equidistância e EP de 3/5 da equidistância do produto cartográfico.
- (6) Para o caso de produtos convertidos do meio analógico para o digital, é desejável que esse processo mantenha o padrão original do PEC. Como isso nem sempre é possível, a classificação do produto cartográfico digital poderá possuir a seguinte classificação:
  - Se PEC = A, então PEC-PCD = Até “C”;
  - Se PEC = B, então PEC-PCD = Até “D”;
  - Se PEC = Não disponível, então PEC-PCD = Não disponível.

Em 2016, foi publicada uma norma cartográfica denominada Especificação Técnica para o Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (CONCAR/DSG, 2016).

A ET-CQDG foi constituída em conformidade com as seguintes normas:

- a) ISO 19157:2013, que estabelece os princípios para descrever a qualidade dos dados geográficos;
- b) ISO 2859-1:1999, que define esquemas de amostragem indexados pelo limite de qualidade aceitável para inspeção lote a lote;

- c) ISO 2859-2:1985, que define planos de amostragem indexados pela qualidade limite para inspeção de lotes isolados.

Segundo a ET-CQDG, o conceito de qualidade de um produto está ligado à conformidade com normas específicas. A esse conceito, Servigne et al. (2006) acrescenta a capacidade de um produto ou serviço de satisfazer as necessidades do cliente. Ariza-López (2011) considera a qualidade como critério de distinção entre os produtores que podem oferecer melhores produtos e serviços.

A norma ISO 19157 especifica que as informações a respeito da qualidade do dado podem ser classificadas em:

- a) Informação não quantitativa da qualidade: é a informação de caráter geral, de grande interesse para conhecer o objetivo e o histórico da informação. Segundo a ISO 19157, os elementos não quantitativos da qualidade são: propósito, uso e linhagem. Esses elementos são descritos nas normas relativas a metadados como o Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil – Perfil MGB (CONCAR, 2009);
- b) Informação quantitativa da qualidade: diz respeito ao comportamento da informação geográfica (IG) que pode ser medido. É descrita por meio dos chamados elementos de qualidade, que são conhecidos como componentes da qualidade do dado geográfico.

Os elementos da qualidade foram agrupados em cinco categorias:

- 1) Completude: refere-se aos dados estarem completos ou não, e em que grau;
- 2) Consistência lógica: é o cumprimento de todas as regras lógicas de relacionamento entre os elementos do produto cartográfico;
- 3) Acurácia posicional: é a correta posição, planimétrica e altimétrica, dos dados;
- 4) Acurácia temporal: é a exatidão encontrada na componente temporal dos dados (atualizado ou não; data);
- 5) Acurácia temática: refere-se aos atributos corretos dos dados.

Como o propósito deste trabalho é a avaliação da acurácia altimétrica, o único elemento da qualidade a ser detalhado será a acurácia posicional.

Segundo Merchant (1982) e Galo e Camargo (1994), a acurácia posicional é obtida a partir do cálculo das diferenças entre as coordenadas de feições em uma fonte de referência (mais precisa e acurada) e seus pontos homólogos no produto a ser avaliado, comparando os indicadores estatísticos obtidos com os parâmetros fixados pelas normas para cada classe de produto.

Segundo a ET-CQDG (2016), a acurácia posicional pode ser classificada em:

- 1) Absoluta ou externa: quando se compara a discrepância entre as coordenadas da representação da feição e as coordenadas das feições na fonte de maior precisão;
- 2) Relativa ou interna: quando se compara a discrepância entre as posições relativas dos objetos e as posições relativas reais ou aceitas como sendo certas; e
- 3) Do GRID: aplicação do conceito de acurácia posicional absoluta para os dados que se caracterizam por estarem em uma malha regular ou malha de pontos de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A especificação ET-CQDG apresenta o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD), que é a medida da acurácia posicional absoluta, tanto para a planimetria como para a altimetria. Esse instrumento indica o Padrão de Exatidão Cartográfica para um produto geoespacial baseado no erro máximo admissível (EM) e no erro padrão (EP) para a planimetria e para a altimetria (tabelas 3.9 a 3.11).

Tabela 3.9 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria e altimetria, para um Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais (CDGV) em grandes escalas.

Tipo	PEC	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
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

Fonte: CONCAR – ET-CQDG (2016).

Tabela 3.10 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria e altimetria, para cartas topográficas em pequenas escalas.

Tipo	PEC	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Planimetria	A	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
	B	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
	C	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00
Altimetria	A	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
	B	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
	C	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: CONCAR – ET-CQDG (2016).

Tabela 3.11 - Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria e altimetria, para cartas topográficas em grandes escalas.

Tipo	PEC	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Planimetria	A	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	B	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	C	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Fonte: CONCAR – ET-CQDG (2016).

### 3.3 Indicadores estatísticos de acurácia

O método desenvolvido pelo NDEP/ASPRS (NDEP, 2004) para calcular a acurácia altimétrica consiste em obter o valor do RMSE (*Root Mean Square Error – Erro Médio Quadrático*) do conjunto de dados a ser testado e multiplicar pelo valor 1,96, que representa 95% de nível de confiança dos dados testados.

Antes de discutir a vantagem de utilizar esse indicador estatístico ou mesmo essa norma como um todo, convém apresentar alguns esclarecimentos.

A norma brasileira (Brasil, 1984) não menciona nenhuma fórmula ou método para se calcular a acurácia dos dados altimétricos como fez o NDEP/ASPRS, apenas recomenda que seja realizado um teste dos valores altimétricos medidos no documento cartográfico, comparando os valores medidos a uma referência três vezes mais acurada. Este teste utiliza, como parâmetros, os valores do PEC e do erro padrão que representam, respectivamente, 90% e 60,8% de nível de confiança dos dados testados.

Para a norma brasileira o erro padrão é interpretado como sendo o mesmo valor do desvio padrão e do erro médio quadrático. Já para a Estatística, o desvio padrão é a dispersão da população dos dados; o erro padrão é o valor que representa o quanto a média da amostra se aproxima da média da população dos dados; e o erro médio quadrático é a média dos quadrados das diferenças entre os valores previstos (calculados) e os valores reais (conhecidos).

O trabalho de Deakin e Kildea (1999) esclarece as relações dos termos estatísticos frequentemente utilizados na literatura de mapeamento, tais como, desvio padrão, variância e raiz do valor quadrático médio (RMS). Neste trabalho, o RMS é expresso pela fórmula (2), que é idêntica a fórmula do erro médio quadrático utilizado pelo NDEP/ASPRS (NDEP, 2004).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - a_i)^2} \quad (2)$$

Onde:

RMS = raiz do valor quadrático médio;

$x_i$  = valores medidos;

$a_i$  = um valor aceito (ou de referência).

Segundo os autores, essa fórmula é adequada na modelagem geoidal quando o valor de  $a_i$  é, muitas vezes, igual a zero. Mas, quando o valor aceito (ou de referência) é uma constante ( $a$ ), o cálculo do RMS desdobra-se na fórmula (3).

$$(RMS)^2 = \left\{ \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \right\} + (\bar{x} - a)^2 \quad (3)$$

Onde:

RMS = raiz do valor quadrático médio;

$x_i$  = valores medidos;

$\bar{x}$  = a média da amostra; e

$a$  = um valor constante.

A fórmula (3) traduzida em conceitos, significa:

$$(\text{RMS})^2 = \text{estimativa da variância} + (\text{estimativa da tendência})^2$$

Desse modo, quando a tendência for igual a zero, tem-se:

$$(\text{RMS})^2 = \sigma^2 = \text{variância, ou}$$

$$\text{RMS} = \sigma = \text{desvio padrão.}$$

Ou seja, para o caso em que o valor de referência for constante, se não houver tendência na amostra, a raiz do valor quadrático médio será igual ao desvio padrão.

O trabalho de Monico et al. (2009) utilizou a fórmula (4) a fim de obter a acurácia. Esta fórmula incorporou tanto a tendência (erros sistemáticos) quanto a precisão (erros aleatórios).

$$\text{MSE} = \sigma_p^2 + (b)^2 \tag{4}$$

Onde:

MSE = erro médio quadrático

$\sigma_p^2$  = variância da amostra (ou incerteza);

$b$  = tendência (a média das discrepâncias entre os valores conhecidos e os valores medidos -  $\Delta$ ).

Nesta interpretação, se não houver tendência, o erro médio quadrático será igual à variância.

O trabalho de Merchant (1982) esclarece que o teste de acurácia pressupõe que os erros sistemáticos (que são interpretados como tendência por Galera et. al., 2009) tenham sido eliminados ou que o produto a ser avaliado esteja isento destes erros.

Carvalho e Silva (2018) realizaram um trabalho de revisão dos métodos de análise da acurácia altimétrica no Brasil. Os autores recomendam que o uso de análises de tendência e precisão devem ser utilizados de forma cuidadosa, sendo importante realizar primeiramente um estudo sobre a normalidade dos dados amostrais. Verificada a possibilidade de não normalidade dos dados, deve-se evitar o

uso destes tipos de análises para evitar resultados equivocados. Neste caso, uma possível solução é utilizar os padrões da ASPRS (2014), visto que estes contemplam a situação de distribuição não-normal para discrepância de dados altimétricos.

## **4 A ACURÁCIA DOS DADOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DO NATIONAL DIGITAL ELEVATION PROGRAM (NDEP)**

Nas normas brasileiras não há especificações para a acurácia altimétrica dos produtos obtidos pela tecnologia LiDAR. Por esse motivo, neste capítulo será apresentado o Guia de procedimentos para aquisição e avaliação de Dados de Elevação Digital (*Guidelines for Digital Elevation Data*) do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program – NDEP*), que trata com detalhes desse tema. Assim, a finalidade deste capítulo é preparar a adaptação dessa norma para o caso brasileiro.

Esta norma, publicada em 2004, se refere aos procedimentos adotados exclusivamente pelas instituições que utilizam dados de altimetria nos Estados Unidos e, portanto, haverá diferenças em relação a referenciais utilizados no Brasil. Quando aparecerem no texto, essas diferenças de referenciais altimétricos serão apontadas.

As classificações da acurácia altimétrica, definidas pelo NDEP, foram substituídas por novas classificações definidas pela norma *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014), que apresenta parâmetros de acurácia horizontal e altimétrica para dados geoespaciais digitais, mas não especifica procedimentos para realizar os testes de acurácia.

Portanto, os procedimentos para realizar os testes da acurácia apresentados pelo NDEP continuam válidos. A comparação entre a classificação da acurácia altimétrica do NDEP e da ASPRS será apresentada na seção 4.5, mais adiante.

### **4.1 Requisitos da acurácia altimétrica**

Segundo esse guia, a acurácia altimétrica é o principal critério na especificação da qualidade dos dados digitais de altimetria e os requisitos da acurácia altimétrica desejável dependem da aplicação do usuário.

Há cinco aplicações principais em que uma acurácia altimétrica mais exigente é normalmente requerida em conjuntos de dados digitais de altimetria:

- a) para segurança na navegação marítima onde é necessário a realização da batimetria em águas rasas;

- b) para gestão das águas pluviais e das planícies de inundação em terreno plano;
- c) para a gestão das terras úmidas e outras áreas planas ecologicamente sensíveis;
- d) para a gestão de infraestrutura de áreas urbanas densas onde os mapas planimétricos são normalmente necessários em escalas de 1:2.000 e maiores; e
- e) para aplicações especiais da engenharia, onde são necessários dados de altimetria de alta acurácia.

Considerando que existe uma tendência para especificar o máximo rigor possível para muitas outras aplicações, não só na acurácia, mas também na densidade de pontos por metro quadrado, os usuários devem entender que padrões menos rigorosos podem ser suficientes, especialmente quando confrontados com o aumento dos custos para os dados de altimetria mais densos e de maior acurácia.

Para a compreensão dessa diretriz, é necessário definir três conceitos<sup>7</sup> de acurácia altimétrica, a saber: fundamental, consolidada e suplementar. Essa distinção, ainda que modificada recentemente, é interessante pois contempla diferentes situações reais de cobertura do solo.

A acurácia altimétrica fundamental é o valor pelo qual a acurácia altimétrica pode ser avaliada com segurança e comparada com um conjunto de dados de referência. Esta acurácia é calculada normalmente ao nível de confiança de 95% em função do RMSE (*Root Mean Square Error*) altimétrico. A acurácia altimétrica fundamental de um conjunto de dados (nuvem de pontos, TIN, MDE) deve ser determinada com o auxílio de pontos de controle situados apenas em terreno aberto, onde há uma probabilidade elevada de que o sensor tenha detectado a superfície do solo.

A acurácia altimétrica consolidada é o resultado de um teste de acurácia de 40 ou mais pontos de controle (valores altimétricos) consolidados para duas ou mais das

---

<sup>7</sup> Na norma atual da ASPRS (2014) a acurácia vertical não é mais classificada em: fundamental, suplementar e consolidada. Para terreno sem vegetação, a acurácia é classificada como NVA (*Non-vegetated Vertical Accuracy*). Para terreno com vegetação, a acurácia é classificada como VVA (*Vegetated Vertical Accuracy*). A acurácia vertical consolidada não é utilizada pela ASPRS (2014). A comparação entre a classificação do NDEP e da ASPRS, como apontado, está na seção 4.5.

principais categorias de cobertura do solo, representando tanto o terreno aberto como outras categorias de cobertura do solo. Ela é calculada usando o percentil 95, um método de teste não paramétrico em que 95% dos erros têm valores absolutos iguais ou inferiores a um valor especificado. Uma acurácia altimétrica consolidada é sempre acompanhada por uma acurácia altimétrica fundamental.

A acurácia altimétrica suplementar é o resultado de um teste da acurácia dos valores altimétricos sobre áreas com categorias ou combinações de categorias de cobertura do solo diferentes de terreno aberto. Ela também é obtida utilizando o percentil 95. A acurácia altimétrica suplementar é sempre acompanhada por uma acurácia altimétrica fundamental.

O NDEP recomenda que os usuários tentem avaliar os requisitos de acurácia altimétrica em termos do dano potencial que poderia ocorrer para a saúde pública e para a segurança, caso os dados digitais de altimetria não atendessem à acurácia altimétrica especificada.

Muitos estados da união (EUA) têm regulamentos que exigem que os dados digitais de altimetria sejam produzidos por indivíduos licenciados a fim de proteger o público de qualquer dano que um produtor de dados incompetente possa causar. O licenciamento está geralmente ligado à experiência em provar que os produtos são entregues de acordo com os padrões de exatidão cartográfica<sup>8</sup> (*National Map Accuracy Standards – NMAS*), ou equivalente.

É importante especificar a acurácia altimétrica esperada para todos os produtos finais a serem entregues. Por exemplo, quando curvas de nível ou malhas de MDE são especificadas como resultados de fotogrametria ou de nuvem de pontos LiDAR, pode-se produzir uma TIN a partir dos pontos do MDE ou das curvas de nível derivadas diretamente do levantamento aerofotogramétrico (ou terrestre).

Se feito corretamente, o erro introduzido durante o processo de conversão de TIN para curvas de nível / MDE deve ser mínimo; no entanto, um certo valor de erro, ainda que de menor monta, pode ser introduzido e deve ser controlado.

A acurácia não deve ser especificada e testada para a TIN com a expectativa de que os produtos derivados dela atenderão à mesma acurácia. Isso porque os derivados podem apresentar um erro maior, especialmente quando a generalização ou a suavização da superfície forem aplicadas ao produto derivado.

---

<sup>8</sup> Essa especificação refere-se à norma americana.

A especificação de acurácia do(s) produto(s) final(is) exige que o produtor de dados garanta que os erros parciais sejam mantidos dentro dos limites necessários em todas as fases da produção.

A acurácia altimétrica de modelos, nuvem de pontos, TIN ou MDE é também uma função da resolução horizontal dos dados topográficos digitais. Não há regras estabelecidas que correlacionem diretamente a resolução horizontal dos dados digitais de altimetria com a acurácia altimétrica, mas há um consenso geral de que uma TIN ou um MDE equivalente às curvas de nível de 1 m devem ter equidistância mais estreita do que uma TIN ou MDE equivalente às curvas de nível de 2 m, por exemplo.

Testes de dados de altimetria em diversas categorias de cobertura do solo revelaram que a magnitude e a distribuição dos erros muitas vezes variam com os diferentes tipos de cobertura. Para os propósitos do NDEP, a acurácia altimétrica "fundamental" do conjunto de dados (acurácia exigida em terreno aberto) é um dado que deve ser especificado.

Se a acurácia especificada estiver dentro de categorias variadas de cobertura do solo (como por exemplo, vegetação baixa, média, alta, área urbana, ou outras categorias), as acurácias suplementares devem ser indicadas para as categorias individuais ou múltiplas. Pode ser preferível especificar uma acurácia altimétrica diferente em áreas florestadas, por exemplo, do que no pasto. Os requisitos da acurácia suplementar devem ser explicados em documentação anexa.

## **4.2 Requisitos da acurácia horizontal**

A acurácia horizontal é outra característica importante dos dados de altimetria. No entanto, ela é em grande parte correlacionada com a acurácia altimétrica desejada. Se for necessário uma acurácia altimétrica muito elevada, então será essencial para o produtor de dados manter uma acurácia horizontal também muito elevada. Isto acontece porque os erros horizontais em dados de altimetria, com raras exceções, contribuem significativamente para o erro detectado nos testes de acurácia altimétrica, por deslocamento da posição correta.

O erro horizontal é mais difícil de avaliar no produto final de altimetria do que o erro altimétrico. Isso ocorre porque em algumas regiões da superfície da Terra muitas

vezes não possui características topográficas distintas, bem definidas, necessárias para tais testes, ou porque a resolução dos dados de altimetria é demasiadamente grosseira para localizar com acurácia as características distintas da superfície. Por estas razões, o NDEP não prevê nem exige testes de acurácia horizontal de produtos de altimetria. Em vez disso, o NDEP exige que os produtores de dados informem a acurácia horizontal esperada dos produtos de altimetria, conforme determinado a partir de estudos do processo ou outros métodos, mais explicados na seção 4.4.7.

A especificação da acurácia horizontal exige que o produtor de dados garanta que a tecnologia apropriada e a estrutura de controle horizontal sejam aplicadas durante a coleta e o processamento dos dados altimétricos.

Para a acurácia horizontal, o NSSDA (1998) implantou uma metodologia de teste estatístico para estimar a acurácia posicional dos pontos nos mapas e nos dados geoespaciais digitais com relação a posições de pontos georreferenciados claramente definidos e de maior acurácia.

Estabeleceu-se o erro médio quadrático radial ( $RMSE_r$ ). A acurácia radial (Acurácia<sub>r</sub>) ao nível de confiança de 95% foi estabelecida como  $1,7308 \times RMSE_r$ , assumindo que os erros sistemáticos tenham sido eliminados previamente da melhor forma possível e que os erros têm uma distribuição normal.

A Acurácia<sub>r</sub> é definida como “o raio de um círculo de incerteza, de tal forma que a localização verdadeira ou teórica do ponto caia dentro do círculo 95% das vezes”.

### **4.3 Avaliação da acurácia e relatórios**

Nessa seção serão apresentadas as especificações da avaliação da acurácia e os relatórios preconizados pela norma NDEP (2004).

#### **4.3.1 Considerações gerais**

O NSSDA (1998) especifica que a acurácia, tanto a horizontal como a altimétrica, devem ser referidas ao nível de confiança de 95% para os dados testados contra uma fonte independente de maior acurácia e a redação do texto de certificação deve ter a seguinte forma:

“Comprovado que atende a uma acurácia horizontal de \_\_\_\_metros, ao nível de confiança de 95%”.

“Comprovado que atende a uma acurácia altimétrico de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95%”.

Para a finalidade do NDEP, a fonte independente deve ter, pelo menos, uma acurácia três vezes maior do que o conjunto de dados que está sendo testado, sempre que possível (MERCHANT, 1982).

O NSSDA afirmou ainda que uma declaração alternativa "produzido para atender" deve ser usada quando as diretrizes para testes por uma fonte independente de maior precisão não pôde ser seguida e, então é usado uma forma alternativa para avaliar a acurácia. A acurácia deve ser referida ao nível de confiança de 95% para os dados produzidos de acordo com procedimentos que têm sido consistentemente testados para alcançar determinados valores de acurácia horizontal e / ou altimétrica. A redação deve ser:

“Produzido para atender a uma acurácia horizontal de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95%”.

“Produzido para atender a uma acurácia altimétrica de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95%”.

Para a finalidade do NDEP, a declaração "produzido para atender" deve ser usada por produtores de dados quando resultados de testes independentes não estiverem disponíveis ou não puderem ser obtidos de forma prática. Por exemplo, pode ser impossível testar a acurácia altimétrica com uma fonte independente de maior precisão em terreno muito distante ou acidentado. A acurácia horizontal dos conjuntos de dados altimétricos (não só os que são provenientes do LiDAR) é, geralmente, bem difícil de testar porque as feições horizontais (planimétricas) normalmente não são bem definidas nesses produtos (NDEP, 2004).

É importante notar que o presente teste da NSSDA (1998) para a acurácia altimétrica e horizontal é válido apenas se os erros para o conjunto de dados seguem uma distribuição normal ou gaussiana<sup>9</sup>. Algumas modificações da NSSDA para testes e relatórios da acurácia das distribuições de erro não-normais foram recomendados pela NDEP para o *Federal Geographic Data Committee* (FGDC, 1998).

Considerando que os erros horizontais e altimétricos em terreno aberto normalmente têm uma distribuição normal, os erros altimétricos normalmente não seguem uma distribuição normal nas outras categorias de cobertura do solo,

---

<sup>9</sup> Existem testes para verificar a normalidade de uma distribuição, utilizando normalmente os valores da curtose e da assimetria.

especialmente na vegetação densa onde os sensores ativos e passivos são incapazes de detectar o chão. Por esta razão, são fornecidas diretrizes adicionais do NDEP, para determinar a acurácia altimétrica dos dados digitais de altimetria em categorias de cobertura do solo distintas do terreno aberto (por exemplo, áreas florestadas, arbustivas, campos de trigo ou de milho, capinzal, mangue, pântano, terreno urbano).

#### **4.3.2 Planejamento dos testes de acurácia**

O NSSDA (1998) especifica a seguinte diretriz: "Se dados de acurácias variadas podem ser identificados separadamente para conjuntos de dados, calcule e indique os valores separados da acurácia". Muitos fatores podem variar ao longo do tempo e do espaço para qualquer projeto de aquisição de dados altimétricos. Grandes variações de certos fatores podem ter uma influência significativa sobre a acurácia resultante dos dados. Para obter uma acurácia estatística que seja significativa e representativa dos dados, possíveis variáveis, tais como as discutidas a seguir, devem ser consideradas durante os testes de acurácia.

##### **a) Continuidade na coleta e no processamento dos dados**

Os produtores de dados têm sistemas e procedimentos exclusivos para coleta e processamento de dados altimétricos. Quando sistemas de coleta diversos forem utilizados para reunir dados da mesma área do projeto, os dados devem ser testados separadamente por cada sistema.

Os componentes do sistema (equipamentos, procedimentos, programas, etc.) também podem variar ao longo da vida de um projeto. Quando há razão para suspeitar que tais mudanças possam ter um efeito significativo sobre a acurácia, essas variações devem ser testadas separadamente.

##### **b) Variação topográfica**

Diversos tipos de topografia (como terreno montanhoso, ondulado, ou terreno plano) dentro de um projeto podem afetar a acurácia com a qual a superfície pode ser modelada.

Além disso, para muitas aplicações, a exigência da acurácia em terreno muito movimentado (com alta energia ou grande variação de relevo) pode ser menor do que para um terreno plano. Em tais situações, pode ser preferível especificar diferentes requisitos da acurácia para os diferentes tipos de terreno e modelar testes separados para cada um deles.

### c) Variação da cobertura do solo

Estudos têm demonstrado que o erro altimétrico pode ser significativamente afetado por vários tipos de cobertura do solo. Uma vez que a vegetação pode limitar a detecção do chão, florestas densas e até mesmo a grama alta tendem a causar erros altimétricos maiores do que em terreno aberto (grama curta).

Erros medidos em áreas de diferentes coberturas do solo também tendem a ser distribuídos de forma diferente dos erros medidos em terreno aberto. Por estas razões, o NDEP recomenda que o terreno aberto seja testado separadamente dos outros tipos de cobertura do solo.

Testes sobre qualquer outra categoria de cobertura do solo são necessários apenas se essa categoria constitui uma parte significativa da área do projeto considerada crítica para o cliente.

### **4.3.3 Seleção e coleta de pontos de controle**

Os pontos de controle devem ser bem distribuídos por toda a região em que se situa o conjunto de dados. O NDEP recomenda a seguinte orientação da NSSDA (1998) na escolha da localização de pontos de controle: eles devem ser distribuídos mais densamente nas proximidades das feições de maior importância e mais escassamente em áreas que são de pouco ou nenhum interesse. Quando a distribuição do erro não for aleatória, mas houver concentração de erros em determinadas regiões, é desejável localizar os pontos de controle (sua quantidade) de forma a examinar com mais atenção as regiões com maior probabilidade de erro.

Para um conjunto de dados que abranja uma área retangular que se acredita ter acurácia posicional uniforme, os pontos de controle podem ser distribuídos de modo que os pontos estejam espaçados a intervalos de pelo menos 10% da distância diagonal do retângulo e, que pelo menos 20% dos pontos esteja localizado em cada quadrante do conjunto de dados, como ilustrado na figura 4.1.

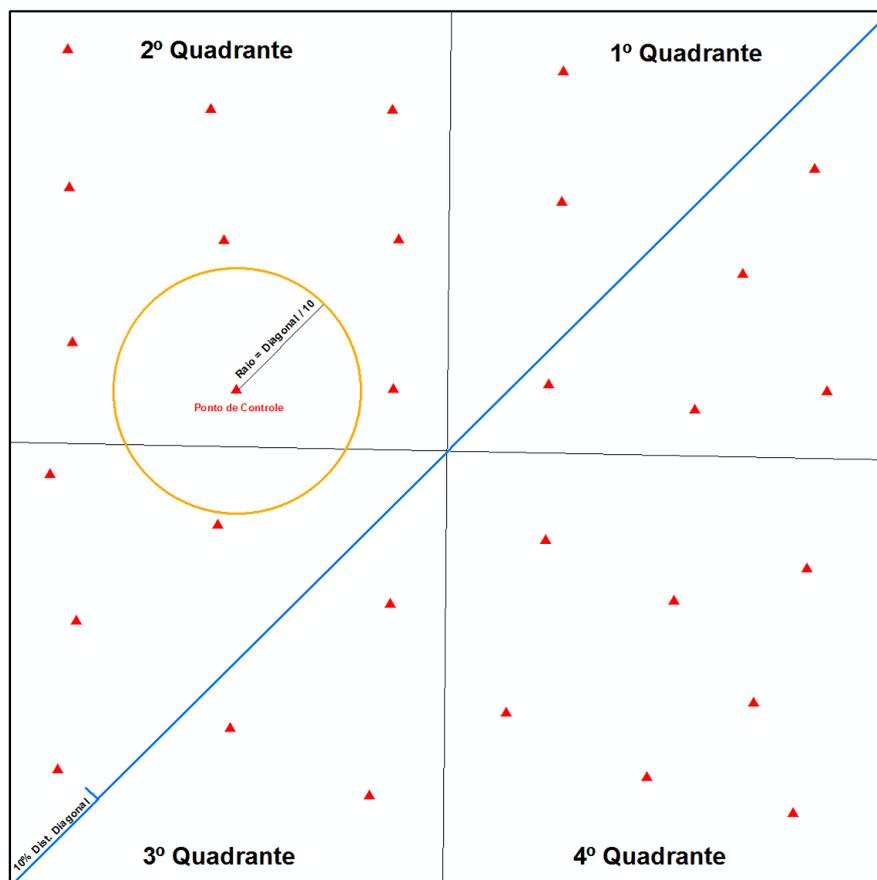


Figura 4.1 - Ilustração do retângulo envolvente, quadrantes, distância diagonal e localização dos pontos de controle. Fonte: Elaborado pela autora a partir da descrição da NSSDA (1998).

#### a) Categorias de cobertura do solo

O NSSDA especifica que um mínimo de 20 pontos de controle<sup>10</sup> deve ser testado, em uma distribuição que retrate a área geográfica de interesse e a distribuição do erro no conjunto de dados. Por essa definição, quando 20 pontos são testados, o nível de confiança de 95% permite que um único ponto ultrapasse o limite indicado nas especificações do produto.

No entanto, o NDEP recomenda seguir, sempre que possível, o padrão atual da indústria de utilizar um mínimo de 20 pontos de controle (sendo preferível 30 ou 32) em cada uma das principais categorias de cobertura do solo representantes da área para a qual a modelagem digital de elevação deve ser executada. Isso ajuda a identificar erros sistemáticos potenciais em um conjunto de dados altimétricos.

<sup>10</sup> O número 20, indicado por Merchant (1982) e repetido em muitas normas, advém da consideração de que deve ser um número estatisticamente suficiente e significativo e ao mesmo tempo não muito oneroso (comparado, por exemplo, com os 32 normalmente utilizado para garantir a normalidade da amostra).

Assim, se forem estabelecidas como necessárias cinco categorias de cobertura do solo, seria preciso um mínimo de 100 pontos de controle no total (NDEP, 2004).

As categorias mais comuns de cobertura do solo são as seguintes:

- i. Terreno aberto (areia, pedra, argila, campos arados, gramados, campos de futebol);
- ii. Macega (ervas daninhas e outras espontâneas) e culturas;
- iii. Terrenos arbustivos e árvores baixas;
- iv. Áreas florestadas totalmente cobertas por árvores;
- v. Áreas urbanas com densas estruturas feitas pelo homem.

Cabe ao produtor de dados e ao cliente determinar as principais categorias de cobertura do solo a serem testadas. A seleção e definição das categorias de cobertura do solo devem ser baseadas, ou na mistura de todos os tipos de coberturas, ou nas variações da cobertura do solo para o local do projeto e no potencial efeito de cada uma na utilização do modelo da superfície para os propósitos do usuário.

Por exemplo, para algumas aplicações, a distinção entre gramado, arbusto, e floresta pode não ser suficiente. Nesse mesmo sentido, onde uma acurácia altimétrica maior for uma necessidade, pode ser importante entender como as variações da altura e da densidade do gramado afetam a acurácia altimétrica final. Em tais situações, pode ser preferível separar o gramado em duas ou mais categorias, com base nas espécies ou características dessa vegetação.

Se as categorias de ocupação do solo forem definidas pelo usuário ou escolhidas com base em categorias de ocupação do solo existentes, elas precisam ser mencionadas nos metadados.

As categorias definidas pelos usuários devem ser simples, descritivas e representativas das principais categorias de ocupação do solo existentes.

Por exemplo, na base de dados de cobertura do solo<sup>11</sup> (*ANDERSON or National Land Cover Dataset, 1976*) há um só nível para os gramados, mas há 11 níveis para áreas residenciais, 16 níveis para áreas urbanas mistas ou construídas, e 17 outros níveis para áreas diferentes das áreas urbanas ou construídas.

Há uma categoria para pastagem e 21 para terras agrícolas, embora terras agrícolas, normalmente, possuem uma vegetação mais alta do que “terreno aberto”.

#### b) Pontos de Controle

---

<sup>11</sup> Essa base de dados de cobertura do solo é americana.

No controle de qualidade (CQ), os pontos de controle (que podem ser obtidos por técnica GNSS) devem ser selecionados em terreno plano, ou em terreno uniformemente inclinado em “x” metros em todas as direções a partir de cada ponto de controle, onde “x” é o espaçamento nominal do MDE ou da densidade estimada da nuvem de pontos<sup>12</sup>. Embora o terreno plano seja preferível, para coletar amostras, isto nem sempre é possível.

Sempre que possível, a declividade do terreno do local onde se coletam os pontos, não deve ser mais acentuada do que 20%, porque os erros horizontais vão influenciar acentuadamente nos cálculos do RMSE altimétrico. Por exemplo, um erro horizontal admissível de 1 metro poderia causar um erro altimétrico evidente e inadmissível de 20 centímetros num determinado MDE.

Além disso, os pontos de controle nunca devem ser selecionados perto de locais com mudança abrupta de declividade, como é o caso de taludes e outros semelhantes como pilares de ponte, beira de estradas, arquibancadas, em suma, locais em que a interpolação posterior pode levar a uma TIN inadequada. Da mesma forma, num MDE deve-se evitar selecionar pontos de controle próximos a essas linhas de quebra.

Os levantamentos dos pontos de controle devem ser realizados em relação às estações de alta acurácia altimétrica do *National Spatial Reference System* – NSRS<sup>13</sup>, preferencialmente com as mesmas estações usadas como bases GPS<sup>14</sup> para o controle da posição da aeronave de mapeamento. Isso minimiza possíveis diferenças altimétricas que podem ser atribuídas ao controle de qualidade inconsistente desse apoio de campo (ponto GPS de referência).

As instruções do Memorando Técnico NOAA NOS NGS-58, "Diretrizes para o Estabelecimento de Alturas Elipsoidais derivadas do GPS (Padrões: 2 cm e 5 cm)", (NOAA, 1997) são recomendadas para estender o controle das estações NSRS selecionadas para a área do projeto, usando o modelo geoidal mais recente para converter as altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas<sup>15</sup>.

---

<sup>12</sup> Mais corretamente, essa distância deve ser medida no terreno inclinado, pois, fora o caso de terreno plano, cada direção em torno de um ponto possui uma inclinação diferente, não podendo esta, portanto ser uniforme.

<sup>13</sup> As estações NSRS referem-se à rede de controle norte americano. No caso do Brasil, o controle é realizado por meio das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC.

<sup>14</sup> Fala-se em GPS por facilidade de compreensão e maior prática de uso; no entanto, pode ser utilizada qualquer conjunto de constelação de satélites GNSS.

<sup>15</sup> No Brasil, o modelo geoidal, mais recente, para converter altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas é o MAPGEO2015.

Procedimentos GPS da técnica RTK (relativo cinemático em tempo real) são aceitáveis enquanto referências provisórias dentro da área do projeto, sugerindo-se que sejam levantadas duas vezes com distinta geometria do satélite.

Posteriormente aos levantamentos GPS com finalidade de estender o controle para a área do projeto, levantamentos convencionais de terceira ordem<sup>16</sup> podem ser usados para estender o controle para pontos de referência que estivessem localizados dentro de áreas florestadas ou "cânions urbanos", onde os sinais de GPS são bloqueados.

O levantamento de pontos fiduciais para controle de qualidade deveria ser tal que a acurácia do ponto de controle fosse, pelo menos, três vezes mais precisa do que o conjunto de dados a ser avaliado. Esse número, também proposto por Merchant (1982) e utilizado por muitos, refere-se a um limite prático estando relacionado ao fato de que erros maiores que três vezes o desvio padrão (que representa 99,73%) em um documento de controle tem uma probabilidade baixa de ocorrer. Por exemplo, supondo que um MDE tenha um RMSE altimétrico de 18,5 cm, equivalente à acurácia exigida para as curvas de nível de 0,60 m, então, os pontos de controle deveriam ser levantados com procedimentos que produzissem um RMSE altimétrico de 6 cm ( $\frac{1}{3}$  do RMSE original), ou melhor.

Geralmente, nos métodos de teste de acurácia e relatórios, existe uma suposição de que os levantamentos dos pontos de controle não possuem erros e que as discrepâncias são atribuíveis à tecnologia de produção do mapa / modelo a ser controlado de menor precisão. Isto é especialmente verdadeiro quando os levantamentos dos pontos de controle são realizados com a tecnologia e os procedimentos aptos a produzir uma acurácia, pelo menos, três vezes maior do que a esperada para os dados testados de sensoriamento remoto, aerofotogrametria e outros semelhantes, entre os quais se inclui o LiDAR.

No entanto, os levantamentos dos pontos de controle nem sempre são livres de erros, e devem ser tomados os cuidados para garantir que todos os erros de inspeção e erros grosseiros sejam identificados. Quando aparecerem discrepâncias, deve-se rever ou refazer o levantamento e processamento dos pontos de controle duvidosos, e também verificar possíveis problemas nos pontos do levantamento

---

<sup>16</sup> Esta especificação refere-se à norma americana.

(locais mal definidos, passíveis de terem sofrido mudança), descartando-os caso existam dúvidas fundadas.

Devido a possíveis desafios nos levantamentos dos pontos de controle, recomenda-se que cada um deles seja escolhido ou demarcado de maneira a poder ser medido novamente.

#### **4.3.4 Obtenção de dados altimétricos para pontos de controle**

Uma vez que os pontos de controle tenham sido coletados e verificados quanto a erros grosseiros, os valores altimétricos, correspondentes a cada um deles, devem ser extraídos de cada conjunto de dados a ser testado. Os procedimentos para a obtenção destes valores altimétricos irão variar em função do modelo de dados altimétricos e das ferramentas computacionais disponíveis para o teste.

Em princípio, os pontos de controle podem ser considerados bem definidos e recuperáveis, mas os pontos levantados e aqueles derivados de uma nuvem de pontos, como uma TIN ou MDE, e curvas de nível podem não sê-lo.

Como os dados digitais de elevação (por exemplo, um conjunto de dados MDE ou TIN) não contêm pontos bem definidos no terreno é quase impossível testar exatamente os mesmos pontos. Portanto, geralmente é necessário interpolar uma altimetria a partir do modelo da superfície na posição horizontal (E, N) de cada ponto de controle.

As interpolações, possíveis de serem realizadas, para se obter o valor de altimetria nos conjuntos de dados a serem testados (TIN, MDE ou curvas de nível) são apresentadas a seguir.

##### **a) Interpolação a partir de uma TIN**

Quando a nuvem de pontos for entregue pelo produtor, uma TIN criada a partir dessa nuvem fornece uma superfície a partir da qual os valores altimétricos podem ser diretamente interpolados (calculados) para a posição horizontal de qualquer ponto de verificação. Uma série de ferramentas de SIG comerciais têm comandos que executam esta interpolação automaticamente para uma dada lista de pontos de controle.

b) Interpolação a partir de um MDE

Quando um MDE for entregue pelo produtor, ele deve ser testado para assegurar que atende à acurácia exigida mesmo quando a TIN (utilizada como matriz desse MDE) foi testada para atender a acurácia. Isso ocorre porque os processos de interpolação para o MDE podem degradar a precisão do modelo da superfície.

Algumas tecnologias, como IFSAR ou InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) e a correlação de imagem produzem diretamente um modelo de superfície de amostragem regular. Se um MDE for testado, a altimetria da superfície na posição do ponto de controle pode ser interpolada utilizando o algoritmo de interpolação bilinear de 4 vizinhos.

c) Interpolação a partir das curvas de nível

As curvas de nível podem ser obtidas diretamente a partir de uma fonte estereoscópica por um operador ou podem ser derivadas a partir de uma TIN ou de um MDE. As curvas de nível devem ser testadas quando forem consideradas como um produto acabado, se elas forem geradas diretamente ou derivadas de outro modelo de dados, mesmo se o modelo da original atende às acurácias exigidas. Isso ocorre porque a acurácia de qualquer produto derivado pode ser degradado por interpolação, generalização, ou suavização, ou seja, durante seu processo de geração.

Os testes das curvas de nível podem ser realizados de duas maneiras. Um método consiste em plotar as posições do ponto de controle em relação às curvas envolventes e interpolar um valor altimétrico para esse ponto de controle entre as curvas adjacentes e aí comparar os dois valores. Outro método consiste em converter as curvas em uma TIN, a partir da qual os valores altimétricos são calculados por um programa SIG (Sistema de Informações Geográficas).

O uso da TIN, como exige a construção de um modelo sem muito controle pode introduzir um erro adicional para os valores altimétricos interpolados. No entanto, se o teste da TIN atende à acurácia, pode-se supor que, em princípio, as curvas que o geraram satisfazem a acurácia. Se a acurácia da TIN falhar, pode ser necessário refazer o teste. Outra forma de testar seria gerar curvas de nível a partir da TIN e compará-las com as curvas de entrada. Isso pode ser feito visualmente, com superposição (usando cores diferentes) ou empregando um método matemático para

medir as discrepâncias (por exemplo, o método dos retângulos equivalentes, como se apresentará mais adiante).

#### 4.3.5 Cálculo dos erros

A “diferença” ou erro para cada ponto da amostra é calculada pela fórmula (5) subtraindo-se da cota do ponto interpolado a altimetria do ponto de controle, sempre supondo uma mesma posição (coordenadas E e N). Assim, se a diferença ou erro for um número positivo, a altimetria avaliada do conjunto de dados é superior ao terreno real (ponto de controle), e se a diferença for um número negativo, a altimetria avaliada do conjunto de dados é inferior ao terreno.

Para o ponto de controle  $i$ ,

$$\Delta H_i = (H_i - H_{ci}) \quad (5)$$

Onde:

$\Delta H_i$  é o erro altimétrico no ponto  $i$ ;

$H_i$  é a coordenada altimétrica do ponto  $i$  no conjunto de dados a ser testado;

$H_{ci}$  é a coordenada altimétrica do ponto de controle  $i$ , obtido de uma fonte independente de acurácia maior;

$i$  é um inteiro de 1 a  $n$ ;  $n$  é o número de pontos a serem avaliados.

#### 4.3.6 Análise dos erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios

Os "erros" medidos em cálculos de acurácia, na teoria, dizem respeito apenas aos erros aleatórios, produzidos por causas diversas, cujos efeitos em observações individuais não são regidos por nenhuma lei conhecida que os conecta com as circunstâncias e por isso não podem ser corrigidos pelo uso de ajustamentos padronizados, como aconteceria no caso de erros sistemáticos provenientes de causas conhecidas. Os erros aleatórios normalmente seguem uma distribuição normal (NDEP, 2004).

Os erros sistemáticos seguem, dependendo do modelo, um padrão fixo e são introduzidos por procedimentos e sistemas de coleta dos dados. Os erros sistemáticos podem ocorrer como deslocamentos da altimetria sobre uma parte ou sobre a totalidade do conjunto de dados. Estes podem ser identificados através da análise

espacial da grandeza do erro e da sua direção ou por análise do erro médio do conjunto de dados.

Os erros sistemáticos também podem ser identificados como desvios, maiores ou menores, dos verdadeiros valores altimétricos causados por erros de interpretação das superfícies do terreno devido a árvores, edifícios, sombras, copas, bancos e estrias. Um erro sistemático é um erro previsível, na teoria, e, conseqüentemente, não aleatório. Sempre que possível, os erros sistemáticos devem ser identificados e eliminados a partir de um conjunto de procedimentos anteriores aos cálculos da acurácia.

Um erro grosseiro é um erro de maior dimensão, normalmente identificado e removido durante a edição ou no processo de controle de qualidade. Um possível erro grosseiro pode ser identificado como qualquer erro maior do que três vezes o desvio padrão (3 sigma) do erro. Erros maiores do que 3 sigma devem ser analisados para determinar a origem do erro e garantir que o erro não é indicativo de alguma fonte inaceitável de erro sistemático. O valor de corte (3 sigma) é determinado pensando que a probabilidade de que ocorram é muito pequena (0,1% calculado na curva de Gauss), ainda que não se descarte sua ocorrência quando o número de pontos for muito grande, como em alguns casos de levantamento LiDAR<sup>17</sup>. Pontos de controle com erro superior ao limite não devem simplesmente ser excluídos da amostra de teste sem investigação, eles podem realmente ser representativo de algum erro residual no modelo de superfície e devem ser relatados nos metadados (NDEP, 2004).

É geralmente aceito que os erros em terreno aberto, sejam provenientes de técnicas de Fotogrametria, LiDAR ou InSAR, representam erros aleatórios no sistema de sensores, enquanto que os erros em áreas vegetadas podem incluir erros sistemáticos. Um único erro grosseiro em uma área de floresta, por exemplo, pode, por sua magnitude, causar tendência nos cálculos de RMSE de uma grande população de pontos de controle, que de outro modo satisfariam os critérios de acurácia.

---

<sup>17</sup> Assim, 0,1% corresponde a um ponto em mil. Quando a quantidade for maior que esse valor, deve-se reavaliar o valor de corte, que será maior que 3 sigma, mantendo a probabilidade de 0,1%.

#### 4.4 Cálculo e relatório da acurácia altimétrica

A acurácia altimétrica fundamental de um conjunto de dados (nuvem de pontos, TIN, MDE), como se apontou, deve ser determinada com pontos de controle situados apenas em terreno aberto, onde há uma probabilidade muito elevada de que o sensor tenha detectado a superfície do solo.

A acurácia fundamental é o valor pelo qual a acurácia altimétrica pode ser avaliada de modo a ser comparada com os outros conjuntos de dados. Esta acurácia é calculada ao nível de confiança de 95% em função do RMSE altimétrico (NDEP, 2004).

Além da acurácia fundamental, valores de acurácia suplementares ou consolidados podem ser calculados para as outras categorias de cobertura do solo ou de combinações de categorias de cobertura do solo.

Como os erros altimétricos geralmente variam com a altura e a densidade da cobertura do solo, não se pode esperar uma distribuição normal de erro e, conseqüentemente, o RMSE altimétrico não pode ser usado para calcular o valor da acurácia ao nível de confiança de 95%. Por essa razão, um método de teste não paramétrico (percentil 95) é, então, empregado para testar a acurácia suplementar ou consolidada (NDEP, 2004).

##### 4.4.1 O Percentil 95

Esse critério preconiza que o cálculo do percentil 95 deve ser utilizado para os testes de acurácia suplementar e consolidada. O percentil 95 pode ser utilizado independentemente de haver ou não erros resultantes de uma distribuição normal e erros qualificados como valores atípicos (erros grosseiros). Calculado por meio de uma simples função estatística, um "percentil" é o valor absoluto interpolado em um conjunto de erros dividindo a distribuição dos erros individuais num conjunto de cem partes de igual frequência. O percentil 95 indica que 95% dos erros no conjunto de dados terão valores absolutos, em módulo, inferiores a um valor especificado, e, portanto, só 5% dos erros será maior que esse limite.

Antes de calcular a acurácia dos dados, devem ser seguidos os seguintes passos:

- a) Separar pontos de controle produzidos para atender o erro esperado;

- b) Editar os pontos de controle coletados para minimizar erros, conforme descrito na seção 4.3.3;
- c) Interpolar o modelo de superfície, como padrão de comparação, para cada local onde foi coletado um ponto de controle;
- d) Calcular as diferenças;
- e) Identificar e eliminar erros sistemáticos e grosseiros.

Uma vez concluídas essas etapas, a acurácia altimétrica fundamental pode ser calculada. Se as categorias de ocupação do solo adicionais tiverem que ser testadas, a acurácia suplementar e/ou consolidada podem ser calculadas também.

#### 4.4.2 Teste da Acurácia Altimétrica Fundamental

Usando pontos de controle apenas em terreno aberto, a NDEP (2004) utiliza as fórmulas (6) e (7):

- a) Calcular:

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (\Delta H_i)^2} \quad (6)$$

- b) Calcular:

$$Acurácia_H = 1,96 \times RMSE_H \quad (7)$$

Onde:

*Acurácia<sub>H</sub>* é a acurácia altimétrica ao nível de confiança de 95% (valor que está implícito no coeficiente 1,96);

- c) Apresentar certificação no relatório da *Acurácia<sub>H</sub>* com o texto: “Comprovado \_\_\_\_ (metros) de acurácia altimétrica fundamental ao nível de confiança de 95% em terreno aberto usando  $RMSE_H \times 1,96$ .”

As declarações de acurácia são opcionais. Quando usadas, devem ser acompanhadas por uma declaração de acurácia altimétrica fundamental. A única exceção possível a essa regra é a situação rara em que não existem áreas acessíveis de terreno aberto (clareiras acessíveis por caminhos, leitos de rios, pastos ou áreas isoladas de terreno exposto) em quantidade suficiente para coletar um número mínimo de pontos de controle. Apenas neste caso a acurácia suplementar ou consolidada pode ser relatada sem o acompanhamento da acurácia fundamental. No entanto, esta

situação deve ser explicada nos metadados, para prevenir o usuário. Ao produzir um modelo de superfície, onde existe pouco ou nenhum acesso a área aberta, o produtor dos dados irá empregar um sistema de coleta que tenha sido previamente testado para atender a certas precisões e uma declaração "produzido para atender" deverá ser usada no lugar da declaração "Comprovado ...".

Segundo a norma NDEP, como os erros altimétricos geralmente variam com a altura e a densidade da cobertura do solo, não se pode esperar uma distribuição normal do erro e, conseqüentemente, o RMSE altimétrico não pode ser usado para calcular o valor da acurácia ao nível de confiança de 95%.

Por essa razão, emprega-se o Percentil 95 para testar a acurácia suplementar e/ou consolidada.

#### **4.4.3 Teste da Acurácia Altimétrica Suplementar**

Esse teste atende às categorias de cobertura do solo ou combinações de categorias de uso do solo, excluindo terreno aberto (NDEP, 2004):

- a) Calcular o erro percentil 95 (descrito acima) para cada categoria (ou combinação de categorias).

Apresentar o seguinte texto / declaração "Produzido para atender a uma acurácia altimétrica suplementar de \_\_\_\_metros, no percentil 95 em (especificar a categoria de cobertura do solo ou categorias de uso do solo)".

- b) Nos metadados, sugere-se documentar os erros maiores do que o percentil 95. Para um pequeno número de erros acima do percentil 95, recomenda-se informar as coordenadas E, N e H, com o erro maior que o do percentil 95, para cada ponto de controle. Para um grande número de erros acima do percentil 95, informar apenas a quantidade e o intervalo dos valores.

#### **4.4.4 Teste da Acurácia Altimétrica Consolidada<sup>18</sup>**

Quando 40 ou mais pontos de controle são consolidados (combinados) para duas ou mais das principais categorias de cobertura do solo, representando tanto o terreno

---

<sup>18</sup> A acurácia altimétrica consolidada (NDEP, 2004) não é mais utilizada pela ASPRS (2014); no entanto, o conceito é interessante e por isso se apresenta.

aberto como outras categorias de cobertura do solo (por exemplo, florestas) para realizar uma avaliação da acurácia altimétrica consolidada pode-se proceder da seguinte forma (NDEP, 2004):

- a) Calcular o percentil 95 (descrito acima) para o terreno aberto e outras categorias combinadas.
- b) Apresentar a declaração "Produzido para atender a uma acurácia altimétrica consolidada de \_\_\_\_metros, no percentil 95 em: terreno aberto, combinado com (especificar todas as outras categorias testadas)".
- c) Nos metadados, recomenda-se documentar os erros maiores do que o percentil 95. Para um pequeno número de erros acima do percentil 95, recomenda-se informar as coordenadas E, N e h, com erro maior que o do percentil 95, para cada ponto de controle. Para um grande número de erros acima do percentil 95, informar apenas a quantidade e o intervalo dos valores.

Se o teste não atender à acurácia requerida, isso indica que há um problema com a fonte, ou com o sistema de coleta, ou com o sistema de processamento ou ainda é um indicativo de que a acurácia alcançável com o sistema de produção do produto cartográfico está superestimada. Se um problema sistemático puder ser identificado, ele deve ser corrigido, quando possível, e os dados corrigidos devem ser retestados.

#### **4.4.5 Os requisitos mínimos para a realização do controle altimétrico**

Segundo Renslow (2012), o requisito mínimo da acurácia altimétrica para a nuvem de pontos não classificada usando a metodologia do NDEP, independente da escala, é:

Acurácia Vertical Fundamental (AVF)  $\leq 24,5$  cm,  $ACC_H$  ao nível de confiança de 95% em função do  $RMSE_H$ ;

Onde:

- $ACC_H$  é a acurácia altimétrica, e
- $RMSE_H$  é o erro médio quadrático altimétrico.

Já os requisitos mínimos da acurácia altimétrica para os MDE's derivados de pontos LIDAR, usando a metodologia do NDEP (2004) são:

- a) Acurácia Vertical Fundamental (AVF)  $\leq 24,5$  cm,  $ACC_H$  ao nível de confiança de 95% em função do  $RMSE_H$ ; e
- b) Acurácia Vertical Suplementar (AVS)  $\leq 36,3$  cm, no percentil 95.

A acurácia da nuvem de pontos deve ser testada em relação à TIN construída a partir dos pontos LiDAR em áreas limpas e abertas.

Uma área limpa e aberta pode ser caracterizada em função da variação da topografia e da cobertura do solo de tal modo que, no mínimo, 5 vezes o espaçamento nominal do pulso tenha erro menor que um terço do  $RMSE_H$  de desvio de um plano de baixa declividade. Áreas com declividade maior que 10% devem ser evitadas para esse teste (NDEP, 2004).

Também não é aceitável realizar o controle altimétrico sobre um terreno que tenha sido alterado antropicamente. Os locais de controle devem ser fotografados mostrando a posição do tripé e a condição da área ao redor dele.

Cada tipo de cobertura do solo que represente 10% ou mais da área total do projeto deve ser testada e considerada como uma AVS (Acurácia Vertical Suplementar). Nas áreas onde a categoria da cobertura do solo é diferente de floresta ou densamente urbanizada, o ponto testado não deve ter obstruções que ultrapassem  $45^\circ$  acima do horizonte para garantir uma superfície TIN adequada. Além disso, as áreas testadas não devem ser próximas a superfícies reflexivas com baixos valores no infravermelho próximo como o asfalto ou amianto.

O valor da AVS é fornecido como um valor desejável. Contudo, em áreas de vegetação densa, alagadas ou terrenos extremamente difíceis de serem testados, esse valor pode ser majorado.

O valor da AVC (Acurácia Vertical Consolidada) é uma exigência que deve atender, independentemente de qualquer fracasso possível na AVS, os tipos de cobertura do solo individuais dentro do projeto.

É necessário que os pontos de controle para cada avaliação (AVF, AVC e todas as AVS) sejam bem distribuídos em todos os tipos de cobertura do solo, para toda a área do projeto (NDEP, 2004).

Há alguns casos em que essas regras são atenuadas:

- a) Quando houver um aumento considerável dos custos para obtenção desta acurácia.

- b) Quando uma especificação alternativa é necessária para uniformizar com as fases previamente contratadas de um levantamento muito abrangente, por exemplo, coletas em âmbito estadual ou nacional por vários anos.
- c) Quando o órgão regulador nacional concorda que é razoável e para a melhor satisfação de todas as partes interessadas em usar uma especificação alternativa.

#### **4.4.6 Relatório da acurácia altimétrica de dados não testados**

A expressão “produzido para atender” deve ser usada quando as orientações anteriores para testes por uma fonte independente de maior acurácia não podem ser seguidas e um meio alternativo é usado para avaliar a acurácia. O relatório deve declarar a acurácia ao nível de confiança de 95% para os dados produzidos de acordo com os procedimentos que foram usados para produzir dados com determinados valores de acurácia altimétrica. A expressão a usar é (NDEP, 2004):

“Produzido para atender a uma acurácia altimétrica fundamental de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95% em terreno aberto”.

As seguintes declarações de acurácia são opcionais. Quando usadas, devem ser acompanhadas por uma declaração de acurácia altimétrica fundamental.

Para as categorias de cobertura do solo que não sejam terreno aberto, declarar:

“Produzido para atender a uma acurácia altimétrica suplementar de \_\_\_\_ metros, no percentil 95 em (especificar a categoria de cobertura do solo ou as categorias)”.

Para cada uma das categorias de ocupação do solo combinadas, declarar:

“Produzido para atender a uma acurácia altimétrica consolidada de \_\_\_\_ metros, no percentil 95 em: terreno aberto, (listar todas as outras categorias relevantes)”.

#### **4.4.7 Testando e declarando a acurácia horizontal**

O NDEP não requer testes independentes de acurácia horizontal para todos os produtos altimétricos. Quando a falta de características distintas de superfície faz com que os testes de acurácia horizontal para nuvens de pontos, TINs, ou MDEs sejam

difíceis ou impossíveis, o produtor de dados deve especificar a acurácia horizontal com a seguinte declaração (NDEP, 2004):

“Produzido para atender a uma acurácia horizontal de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95%”.

O valor da acurácia esperada utilizada para esta indicação deve ser equivalente à acurácia horizontal ao nível de confiança de 95% ( $Acurácia_r = RMSE_r \times 1,7308$ ). Tal acurácia é difícil de verificar, com exceção de áreas de teste de calibração, onde as coordenadas dos quatro cantos de telhados de vários edifícios são avaliadas cuidadosamente (além de pontos de controle estabelecidos em torno desses edifícios) e comparadas com o resultado dos voos de calibração do LIDAR feitos em múltiplas direções.

A acurácia horizontal com que essas linhas de quebra das edificações podem ser determinadas fornece uma boa estimativa da acurácia horizontal alcançável para conjuntos de dados LIDAR obtidos em condições semelhantes.

Para dados altimétricos de alta resolução, em que podem ser identificados detalhes da superfície, tais como junções de dois córregos com pequenas dimensões, ponto mais alto de pequenos montes ou pontos mais baixos de depressões, é possível e desejável testar e declarar a acurácia horizontal resultante.

É também possível testar de forma independente a acurácia horizontal de modelos de superfície do LiDAR e do InSAR, se os dados de intensidade correspondentes forem georreferenciados pelo mesmo processo utilizado para os dados altimétricos (coisa que ocorre normalmente), e se os valores de intensidade permitirem que um número suficiente de feições planimétricas esteja claramente definido para ser localizado.

Por exemplo, números de linhas brancas e pretas em pistas de aeroportos assim como listras pintadas nas estradas, que muitas vezes são visíveis em imagens de intensidade LiDAR.

Quando isso ocorre, é possível fazer um levantamento dessas feições no terreno e comparar as suas coordenadas horizontais com aquelas provenientes das imagens de intensidade LiDAR.

Desta forma, as imagens de intensidade LiDAR se tornam comparáveis às imagens fotogramétricas para as quais o  $RMSE_r$  pode ser calculado de acordo com os procedimentos de teste do padrão NSSDA (1998). Os resultados dos testes de acurácia horizontal devem ser relatados usando a seguinte declaração (NDEP, 2004):

“Produzido para atender a uma acurácia horizontal de \_\_\_\_ metros, ao nível de confiança de 95%”.

#### **4.4.8 Resumo da avaliação da acurácia**

Fornecedores de dados digitais de altimetria usam uma variedade de métodos para controlar a acurácia de seus produtos. Fotogrametristas usam pontos de controle terrestre (levantados em terra por GPS, por exemplo) e de aerotriangulação para controlar e avaliar a acurácia de seus dados.

Fornecedores de dados LIDAR e InSAR podem coletar centenas de pontos de controle por técnicas GNSS (estático ou cinemático) para controle de qualidade interno e para ajustar seus conjuntos de dados a esses pontos de controle.

Tais pontos de controle são usados de forma semelhante para controlar a aerotriangulação, para a qual o conjunto de dados LIDAR ou IFSAR são ajustados para melhor se adequarem a esses pontos de controle, e então, os provedores de dados podem usar as declarações de acurácia "produzido para atender" listadas acima.

Com tecnologias consolidadas, como a fotogrametria, os usuários geralmente aceitam a declaração "produzido para atender".

No entanto, com o desenvolvimento dessas novas tecnologias (LiDAR ou InSAR), os usuários muitas vezes exigem testes de acurácia independentes para os quais o relatório é mais complexo, especialmente quando os erros incluem valores muito discrepantes dos valores da região ou não seguem uma distribuição normal, como é exigido para o uso do RMSE em avaliações de acurácia.

Devido a estas complexidades, o NDEP exige a abordagem da "verdade na publicidade" dos fornecedores, como descrita acima, que informa a acurácia altimétrica em terreno aberto separadamente das outras categorias de cobertura do solo, e que registra a medida dos erros maiores do que o percentil 95 nos metadados.

#### **4.4.9 A acurácia altimétrica relativa**

A medição de acurácia discutida neste capítulo refere-se à acurácia altimétrica absoluta, que engloba todos os efeitos dos erros sistemáticos e aleatórios. Para

algumas aplicações de dados digitais de altimetria, a acurácia altimétrica ponto a ponto é mais importante do que a acurácia altimétrica absoluta. A acurácia altimétrica relativa é controlada pelos erros aleatórios em um conjunto de dados altimétricos.

A acurácia altimétrica relativa de um conjunto de dados é especialmente importante para os produtos derivados que fazem uso das diferenças locais entre valores altimétricos adjacentes, tais como cálculos de declividade e orientação.

Como a acurácia altimétrica relativa pode ser difícil de medir, a menos que um conjunto muito denso de pontos de referência esteja disponível, a diretriz NDEP não prescreve uma abordagem para a sua medição.

Se um determinado nível de acurácia altimétrica relativa é um requisito rigoroso para um determinado projeto, então o plano para a coleta de pontos de referência para a validação deve considerar isso. Ou seja, pontos de referência devem ser coletados na parte superior e na parte inferior das encostas uniformes (NDEP, 2004).

Neste caso, um método de medir a acurácia altimétrica relativa é comparar a diferença entre os valores altimétricos na parte superior e na parte inferior da rampa. A Figura 4.2 mostra uma vista de perfil de um declive representando os pontos verdadeiros e os modelados, e como os valores podem ser utilizados para representar a acurácia altimétrica relativa.

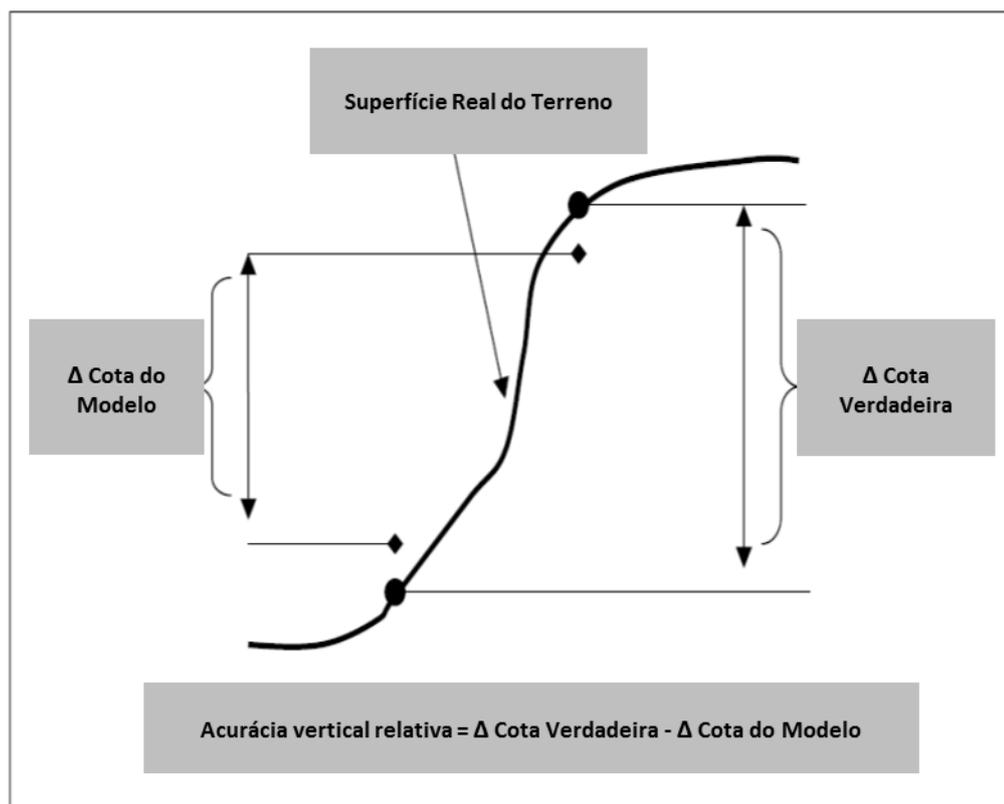


Figura 4.2 - Acurácia Altimétrica Relativa.  
 Fonte: Adaptado de *Guidelines for Digital Elevation Data* (2004)

Em muitos casos, a acurácia altimétrica relativa será melhor do que a acurácia altimétrica absoluta, daí a importância de medir e descrever cuidadosamente a acurácia absoluta, conforme descrito neste capítulo, de modo que os usuários de dados possam ter uma ideia de qual acurácia relativa esperar.

#### 4.4.10 As características específicas do terreno num modelo de superfície

A proposta de um modelo de superfície normalmente é representar uma porção do terreno. As convenções de representação do relevo mudam ao longo do tempo. Devido à crescente variedade de aplicações, a tendência é afastar-se da padronização rigorosa em direção a uma personalização em função da aplicação.

No passado a representação se dava fundamentalmente através de curvas de nível, pontos cotados, perfis, seções transversais. Na atualidade, a essas representações, agregaram-se os modelos digitais de superfície nas formas mais

variadas (nuvem de pontos cotados, malhas quadradas, TIN e outras), complementados por linhas de quebra (*breaklines*) e outros.

O contratante, se necessário com a ajuda do produtor, deve fornecer instruções explícitas para a representação das características que deseja para o produto. Por sua vez, os produtores de dados devem documentar os tratamentos dado às feições presentes no produto, coisa que pode ser feita nos metadados.

No Apêndice A são apresentados os tópicos sobre os elementos que podem influenciar diretamente no processamento dos Modelos Digitais de Elevação, como a hidrografia, as estruturas feitas pelo homem, as feições terrestres especiais, os artefatos e as áreas sem valores altimétricos ou de credibilidade duvidosa.

Stoker et al. (2014) estudou a integração de dados LiDAR, de épocas e lugares distintos (vizinhos), para avaliar as relações entre valores altimétricos e cobertura do solo em ecorregiões colindantes.

Na área de hidrologia, o conceito foi aprofundado pelos pesquisadores Poppenga e Worstell (2015) que utilizaram dados de altimetria LiDAR para avaliar um modelo de superfície com conectividade hidrológica a fim de fazer previsão da propagação de inundação costeira.

#### **4.5 A classificação da acurácia altimétrica utilizada pela nova norma da ASPRS**

Em novembro de 2014, a *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) publicou um novo padrão que fornece parâmetros para avaliar a acurácia altimétrica e horizontal dos dados digitais, intitulado *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*.

Os padrões anteriores incluíam o *National Map Accuracy Standards* (NMAS, 1947), o *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps Standards* (ASPRS, 1990), e o *ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data* (2004).

Nenhum desses padrões anteriores foi criado para abordar as tecnologias atuais disponíveis como, LIDAR, ortoimagem ou mapeamento com o uso de câmeras digitais.

Os novos padrões da ASPRS (2014) alcançam os níveis mais altos de acurácia disponíveis nessas tecnologias mais recentes.

O que era conhecido como Acurácia Altimétrica Fundamental na norma NDEP (2004), na norma ASPRS (2014) passou a ser chamado de Acurácia Altimétrica de

Terreno sem Vegetação (*Non-Vegetated Vertical Accuracy* – NVA), já a Acurácia Altimétrica Suplementar passou a ser chamada de Acurácia Altimétrica de Terreno com Vegetação (*Vegetated Vertical Accuracy* – VVA), como mostra a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação da classificação da acurácia altimétrica entre o NDEP e a ASPRS.

<b>Tipo de cobertura de solo</b>	<b>Classificação utilizada pelo NDEP (2004)</b>	<b>Classificação utilizada pela ASPRS (2014)</b>
Terreno aberto	AVF	NVA
Área urbana	AVS	
Vegetação rasteira	AVS	VVA
Vegetação arbustiva	AVS	
Floresta densa	AVS	
Área Consolidada	AVC	Não se aplica

Fonte: Traduzido de ASPRS (2014).

Para se calcular o valor do NVA, utiliza-se o mesmo procedimento empregado para o cálculo do valor do AVF. Considera-se que a acurácia altimétrica em terrenos sem vegetação segue uma distribuição normal do erro e, portanto, o NVA é calculado ao nível de confiança de 95% em função do RMSE. As áreas sem vegetação incluem pontos localizados em terreno aberto (solo nu, areia, pedras, grama curta) e área urbana (superfícies de asfalto e concreto).

Para calcular o valor do VVA, utiliza-se o mesmo procedimento para o cálculo do valor do AVS. A acurácia altimétrica em terreno com vegetação não segue uma distribuição normal do erro e, portanto, a avaliação é realizada utilizando-se o método de teste não paramétrico percentil 95. Determinar a acurácia no percentil 95 requer o descarte de 5% dos valores mais discrepantes da amostra.

A classificação AVC não foi incorporada ao novo padrão da ASPRS.

## 5 A TRIANGULAÇÃO UTILIZADA NOS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA SUPERFÍCIE

A triangulação é o processo utilizado para a geração de uma TIN (abreviatura em língua inglesa de rede triangular irregular) que, por sua vez, é muito utilizada nos métodos de interpolação de superfícies e, em especial, no processamento de dados LiDAR. Nessa seção, serão apresentados os conceitos da triangulação 2D segundo o Manual do Usuário da CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*).

A Biblioteca de Algoritmos de Geometria Computacional (*Computational Geometry Algorithms Library – CGAL*) é uma iniciativa de desenvolvimento de programas computacionais que fornece acesso aberto a algoritmos geométricos eficientes e confiáveis na linguagem C++.

A CGAL é utilizada em diversas áreas que necessitam de computação geométrica, como sistemas de informação geográfica, desenho assistido por computador (CAD), biologia molecular, imageamento médico, computação gráfica, robótica e muitos outros.

Essa biblioteca oferece estruturas de dados<sup>19</sup> e vários algoritmos, como por exemplo, algoritmos de triangulações, diagramas de Voronoi, operações booleanas em polígonos e poliedros, processamento de conjuntos de pontos (utilizado no processamento LiDAR), arranjos de curvas, geração de malha de superfície e de volume, processamento de geometria, algoritmos *alpha shapes*, algoritmos de fronteira convexa de polígonos (*convex hull*), análise de formas, e outros algoritmos na área de geometria.

### 5.1 A triangulação 2D

A triangulação 2D pode ser definida, de forma simplificada, como um conjunto de faces triangulares de modo que, duas delas sejam disjuntas ou compartilhem uma borda ou vértice, e o conjunto das faces esteja conectado por uma relação de adjacência.

---

<sup>19</sup> Estruturas de Dados são organizações de objetos complexos, utilizados pelos algoritmos geométricos, em tipos de dados mais simples diretamente representáveis pelo computador (MARTHA; PEREIRA, 2015).

As triangulações são construídas de forma incremental e podem ser modificadas por inserção ou remoção de vértices. A vantagem do uso dessa estrutura é a de oferecer facilidade de localização dos vértices.

Uma triangulação 2D, figura 5.1, pode ser vista como uma divisão planar cujas faces limitadas são triangulares e cobrem a fronteira convexa<sup>20</sup> do conjunto de vértices.

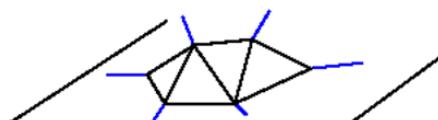


Figura 5.1 - Faces triangulares ligadas por bordas e vértices.

Fonte: Manual do usuário CGAL (2017).

Cada borda da triangulação é incidente em duas faces e o conjunto das faces numa triangulação é topologicamente equivalente a uma esfera bidimensional (círculo).

De modo geral, os elementos básicos da triangulação são vértices e faces. Cada face triangular dá acesso aos seus três vértices incidentes e às três faces de triângulos adjacentes. Cada vértice dá acesso a uma de suas faces incidentes e por meio dessa face o algoritmo computacional acessa suas faces incidentes. As bordas não são explicitamente representadas, elas são representadas apenas através das relações de adjacência de duas faces.

A biblioteca CGAL segmenta as triangulações 2D, figura 5.2, em três tipos: Delaunay, restrita ou Delaunay restrita e regular.

---

<sup>20</sup> A fronteira convexa ou polígono convexo de um conjunto de pontos é o limite do menor domínio convexo no espaço euclidiano n-dimensional contendo esse conjunto (MARTHA; PEREIRA, 2015).

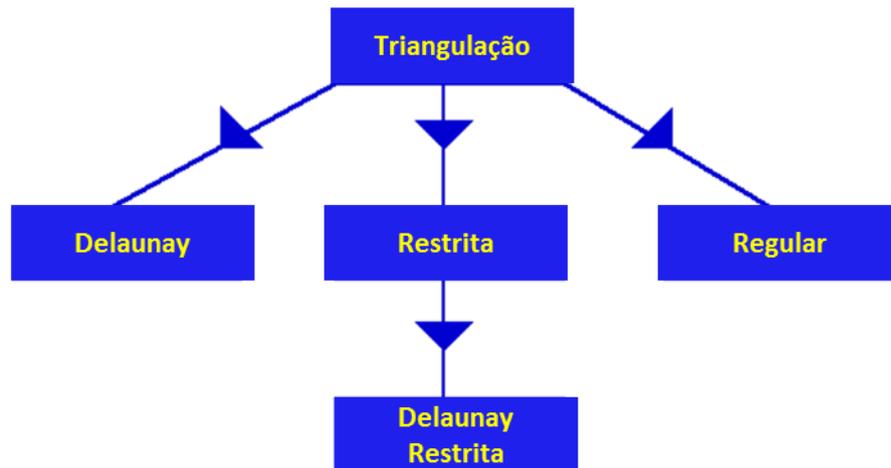


Figura 5.2 - Árvore de derivações da triangulação 2D.  
 Fonte: Adaptado do Manual do usuário CGAL (2017).

A triangulação de Delaunay (CGAL, 2017) deve satisfazer a propriedade do círculo vazio, também chamada de propriedade de Delaunay, ou seja, é uma triangulação onde os vértices dos triângulos não podem estar no interior dos circuncírculos de cada triângulo. Para um conjunto de pontos sem nenhum subconjunto de quatro pontos co-circulares, a triangulação de Delaunay é única; e ela é dual ao diagrama de Voronoi do conjunto de pontos.

Um exemplo de triangulação de Delaunay é mostrado na figura 5.3, e um diagrama de Voronoi é mostrado na figura 5.4.

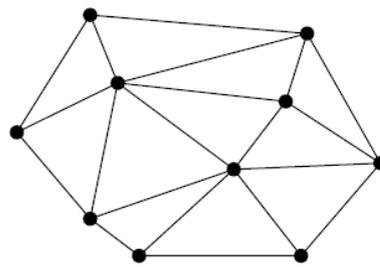


Figura 5.3 - Triangulação de Delaunay.  
 Fonte: Berg et al. (2008).

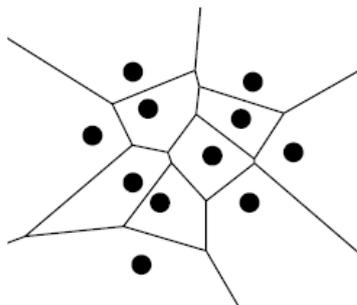


Figura 5.4 - Diagrama de Voronoi.  
Fonte: Berg et al. (2008).

A triangulação de Delaunay maximiza o menor ângulo da triangulação gerando triângulos da melhor qualidade possível em termos angulares, para esses pontos. Esse fator tornou a triangulação de Delaunay a mais conhecida, por otimizar a configuração em termos de maximizar ângulos mínimos. Quando se associa a cada ponto, de um conjunto de pontos, um escalar e estende-se o conceito de círculo vazio, origina-se a triangulação de Delaunay com peso, também chamada de triangulação regular (PIRES, 2008).

Uma triangulação restrita (na qual se inseriram restrições), figura 5.5(a), é uma triangulação de um conjunto de pontos que tem que incluir entre suas bordas um conjunto de polilinhas que unem os pontos. As polilinhas, nesse caso, são chamadas de restrições. As bordas correspondentes são chamadas bordas restritas e na prática da aplicação corresponde à introdução de *breaklines*<sup>21</sup>, definindo linhas que a triangulação não pode cruzar.

Sendo assim, os pontos extremos das bordas restritas são os vértices da triangulação. No entanto, a triangulação pode incluir outros vértices também.

Existem três definições de triangulações restritas. Na definição básica, a triangulação restrita não lida com restrições de interseção e é necessário que o conjunto de restrições de entrada seja um conjunto de segmentos que não se cruzam, exceto, possivelmente, em seus pontos de extremidade. Qualquer número de bordas restritas pode compartilhar o mesmo ponto de extremidade. Bordas restritas podem ser verticais ou ter comprimento zero (CGAL, 2017).

As outras duas definições amparam restrições de entrada com interseção. Nessas definições, as restrições de entrada podem consistir em segmentos que se

<sup>21</sup> As *breaklines* (linhas de quebra) são linhas de descontinuidade da declividade e devem ser introduzidas, a fim de se realizar uma boa modelagem da situação real. Isso garante que não se faça a interpolação ao longo de linhas formadas por pontos em lados opostos de uma linha de quebra (talude e regiões planas adjacentes, por exemplo).

cruzam, se sobrepõem ou se sobrepõem parcialmente. A triangulação introduz vértices adicionais em cada ponto para que sejam o ponto de intersecção de duas restrições. Uma única restrição que intercepte outras restrições aparecerá como várias bordas restritas na triangulação (CGAL, 2017).

Existem duas maneiras de lidar com restrições de intersecção. O primeiro é robusto quando os predicados<sup>22</sup> são avaliados com exatidão, mas as construções, isto é, os cálculos de intersecção, são aproximados. O segundo deve ser usado com aritmética exata, ou seja, com a exatidão dos predicados e do cálculo das intersecções.

Uma triangulação de Delaunay restrita, figura 5.5(b), é uma triangulação com bordas restritas que procuram manter ao máximo os critérios de Delaunay. Como as bordas restritas não são necessariamente bordas Delaunay, os triângulos de uma triangulação de Delaunay restrita não cumprem necessariamente a propriedade do círculo vazio, mas cumprem uma propriedade do círculo vazio restrito mais fraco, ou seja, com exceções na região das restrições (linhas de quebra).

Para fundamentar essa propriedade, é mais prático pensar em bordas restritas como obstrução da paisagem ou vista. Então, uma triangulação é de Delaunay restrita se o círculo circunscrito de qualquer faceta não inclui nenhum vértice visível do interior da faceta<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup> Predicados são funções que precisam ser avaliadas para definir que caminho seguir na sequência de execução de um algoritmo qualquer. Geralmente essas funções retornam um valor Booleano. Em algoritmos de Geometria Computacional, o desenvolvimento de predicados geométricos robustos e precisos é de fundamental importância. (MARTHA; PEREIRA, 2015).

<sup>23</sup> Na geometria, a faceta de uma estrutura geométrica de dimensão  $n$  é uma face, geralmente, de dimensão  $n-1$ . Por exemplo, uma faceta de um poliedro é qualquer polígono cujos cantos são vértices do poliedro (CGAL, 2017).

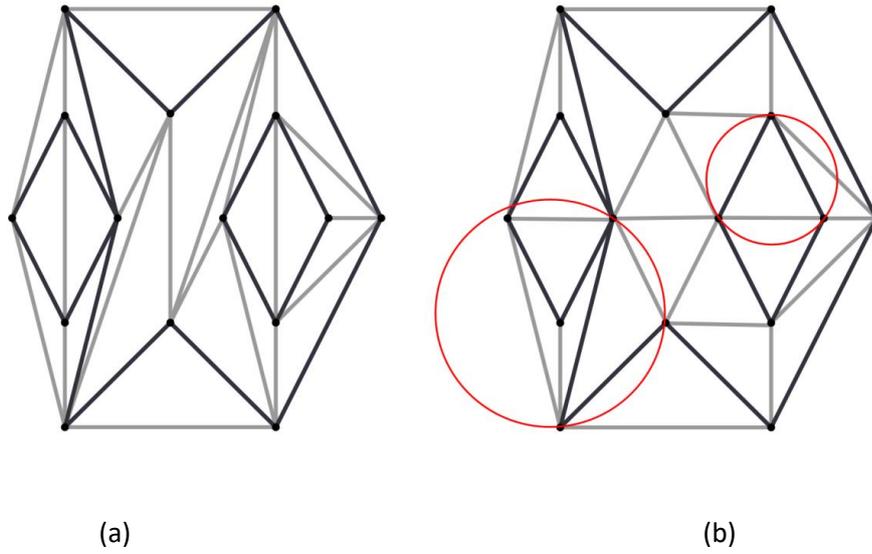


Figura 5.5 - (a) Triangulação Restrita: as bordas restritas são as bordas pretas; (b) Triangulação de Delaunay Restrita: triangulação de Delaunay com dois exemplos de circuncírculos. Reparar que a situação (b) aproxima-se mais da triangulação de Delaunay pura ou sem restrições.

Fonte: Manual do usuário CGAL (2017).

## **6 MÉTODOS E EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DE DADOS LiDAR**

Nesse capítulo, serão apresentados quatro métodos para a avaliação altimétrica dos produtos provenientes do LiDAR: os dois primeiros já são conhecidos e os outros dois são propostas apresentadas neste trabalho.

Inicia-se com a apresentação da área de estudo (seção 6.1), e a forma de obtenção das curvas de nível, que constitui a preparação de dados (seção 6.2) para as análises que se seguem, nos diferentes métodos: o primeiro método que é inspirado na Norma brasileira, considera os erros altimétricos de todos os pontos LiDAR comparando-os a uma distribuição normal (seção 6.3); o segundo método é baseado na metodologia do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos – NDEP (seção 6.4); o terceiro método quantifica a discrepância entre curvas de nível (seção 6.5); o quarto método avalia os valores altimétricos de todos os pontos LiDAR compreendidos entre duas curvas de nível consecutivas transformadas em um polígono fechado (seção 6.6). O primeiro e o segundo método são testados com pontos de controle levantados em campo (seção 6.7), enquanto os demais foram desenhados para casos em que isso não ocorre. Finalmente, é feita uma comparação entre os quatro métodos propostos apresentando suas vantagens/inconvenientes e sua aplicabilidade, com sugestões para os usuários (seção 6.8).

### **6.1 Área de estudo e informações sobre os dados**

A área de estudo, figura 6.1, compreende 22,75 km<sup>2</sup>, situa-se no município de Campinas e abrange as seguintes regiões: os campi da Universidade de Campinas (UNICAMP) e da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas); o Parque Ecológico Prof. Hermógenes de Freitas Leitão; trechos da Rodovia D. Pedro I, da Estrada da Rhodia e do Ribeirão das Anhumas; área urbanizada e uma área de atividade de mineração.

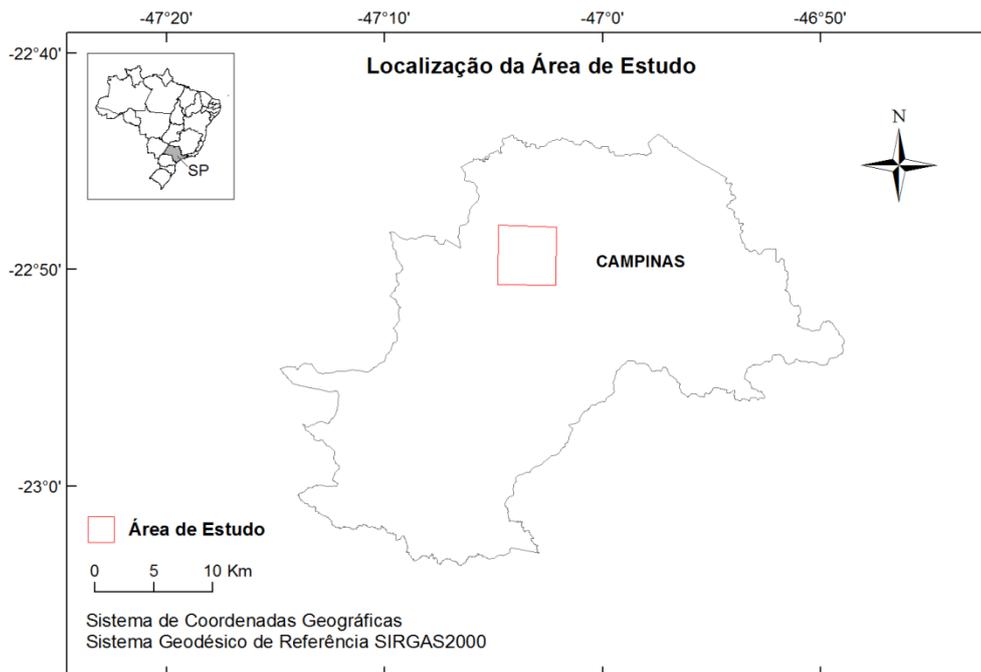


Figura 6.1 - Localização da área de estudo, no município de Campinas (São Paulo).  
Fonte: Elaborado pela autora com os dados cartográficos (2016) e ortofotos (2014) cedidos pela Prefeitura Municipal de Campinas.

Utilizou-se o levantamento LiDAR, obtido com o sensor Harrier 68i da fabricante Trimble, com densidade de 10 pontos por m<sup>2</sup>, executado no ano de 2012 pela empresa

Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda. A empresa executora do levantamento disponibilizou os dados referentes ao terreno, excluindo os pontos referentes à construções, vegetação e outras estruturas acima do solo.

Para obter um segundo produto, a empresa executora fez também uma redução do conjunto de dados com o uso do programa proprietário Inpho da empresa Trimble. Com o processo de redução, o total de pontos da área de estudo, nesse segundo produto, passou a ser 9.099.749, o que equivale a 0,4 pontos por m<sup>2</sup>.

Como referência para a metodologia utilizada nesse trabalho, foi tomada a base cartográfica cedida pela Prefeitura Municipal de Campinas. Essa base foi produzida pelo Consórcio Aerocamp (Aerocarta, Base e Esteio), no ano de 2016, escala 1:1.000, Sistema de Referência Geodésico SIRGAS2000, marégrafo de Imbituba. As ortofotos também cedidas pela Prefeitura Municipal de Campinas foram produzidas pelo Consórcio Aerocamp, no ano de 2014, com resolução espacial (GSD) de 10 cm. Para cobrir a área de estudo foi necessário utilizar 100 arquivos vetoriais “dwg” referentes à base cartográfica e 100 ortofotos.

## **6.2 Processamentos para geração das curvas de nível**

Nesta seção, serão apresentados os processamentos utilizados para a geração das curvas de nível interpoladas a partir dos pontos LiDAR, e para a compilação das curvas de nível de referência provenientes da base cartográfica de Campinas.

### **6.2.1 Curvas de nível interpoladas a partir dos pontos LiDAR**

Os dados provenientes do levantamento LiDAR estavam referenciados à altura elipsoidal ( $h$ ). Foi necessária a conversão da altura elipsoidal para a altitude ortométrica ( $H$ ), o que se fez por meio da ferramenta “lasheight”, do programa computacional LASTools, valendo-se de um modelo geoidal da região de Campinas, elaborado pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S. A., através de amarrações entre RN's<sup>24</sup> do IBGE e pontos levantados por GPS sobre essas RN's. O produto fornecido por essa empresa para o presente trabalho contém dados de ondulação em uma malha regular de espaçamento 1 km e foram interpolados linearmente nos cálculos, figura 6.2.

---

<sup>24</sup> Referências de nível

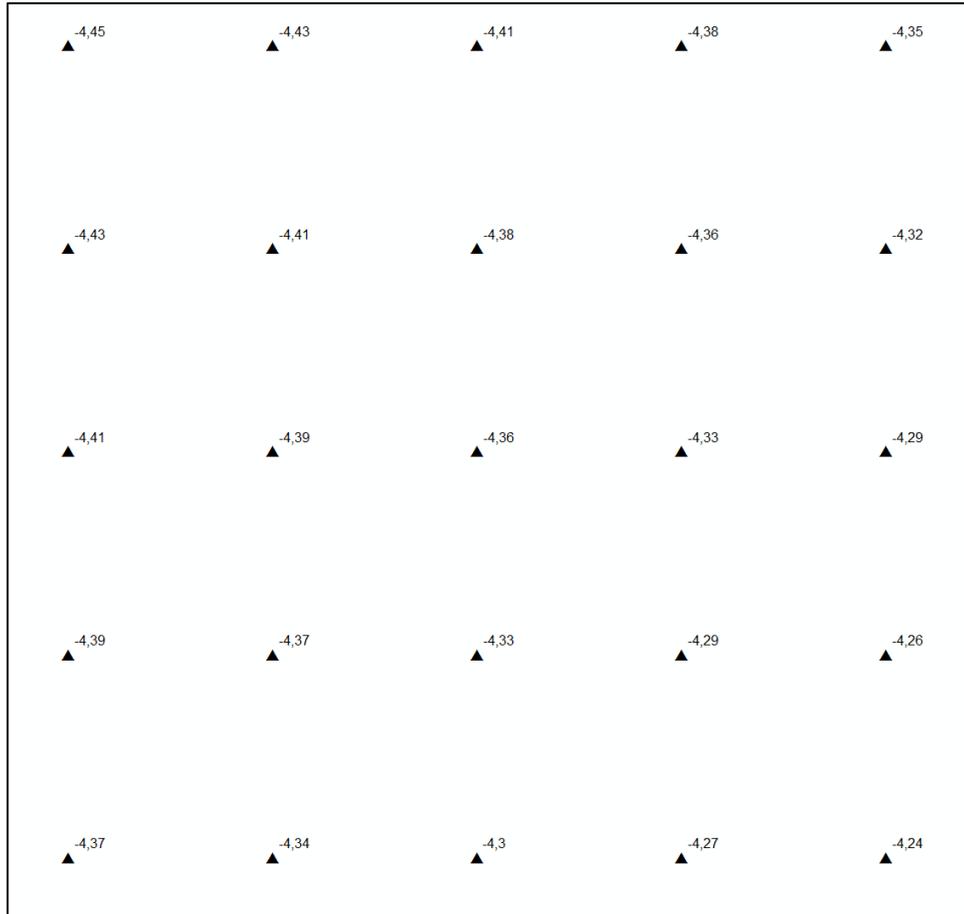


Figura 6.2 - Pontos do modelo geoidal da região de estudo, com os valores de ondulação.  
 Fonte: Elaborado pela autora com os dados cedidos pela Base Aerofotogrametria e Projetos S. A.

O arquivo resultante da conversão foi usado para obter as curvas de nível com equidistância de 1 m, no formato *shapefile*, por meio da ferramenta “las2iso” do programa LASTools.

Após esse processamento, o programa LASTools notificou que ao processar o arquivo com mais de 1,5 milhão de pontos (na versão livre do programa) seria adicionado um pequeno ruído nas curvas de nível geradas. As curvas foram avaliadas na seção 6.5 e essa condição foi testada.

A figura 6.3 mostra um trecho das curvas geradas pelo LASTools como um produto visual.

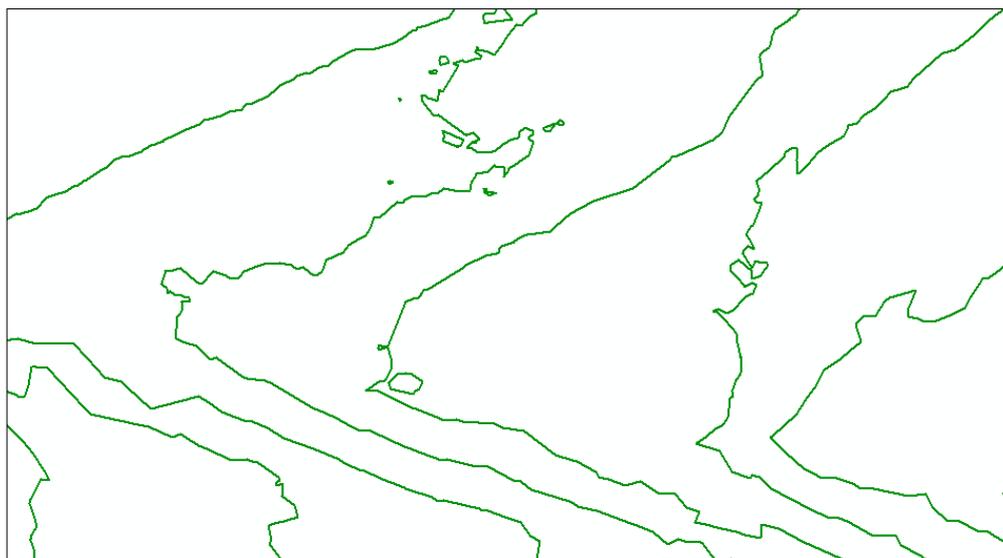


Figura 6.3 - Curvas de nível interpoladas pelo programa LASTools.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Isenburg, que é o desenvolvedor do programa LASTools, informou que o valor da altimetria é armazenado no campo “PolylineZ” do arquivo vetorial *shapefile* (informação pessoal).<sup>25</sup>

Então, utilizou-se uma ferramenta, que já está implementada no programa ArcGIS, para adicionar as informações altimétricas nos *shapefiles* como um atributo.

Percebeu-se a necessidade de suavizar as curvas geradas para melhorar o aspecto das linhas (como se vê na figura 6.3). Para isso, foram usados alguns parâmetros da ferramenta “las2iso” do programa LASTools. Esses ruídos podem fazer parte da mencionada notificação do programa.

A ferramenta “las2iso” possui os seguintes parâmetros: suavização da TIN (um produto intermediário durante esse processamento); simplificação de pequenos elementos; limpeza de linhas curtas; e concavidade: um processo que remove recursivamente todos os triângulos que tem um comprimento de aresta menor que um determinado valor (limiar) e que são adjacentes ao limite da isolinha. Todos esses parâmetros foram testados a fim de adotar valores que permitissem obter linhas mais suavizadas, com a condição de manterem próximas visualmente às curvas originais geradas pelos pontos LiDAR.

Foram feitos alguns testes para garantir a qualidade dessa simplificação. A figura 6.4 mostra a curva original (verde) superposta à curva gerada usando simplificação

<sup>25</sup> Informação fornecida por Martin Isenburg durante o Curso de processamento de dados LiDAR na Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

para elementos considerados pequenos (marrom), por terem comprimento de até 10 m, e limpeza de linhas curtas, também menores que 10 m. O aspecto anguloso da simplificação é pouco perceptível quando desenhado na escala do produto final (menos detalhista que a da figura 6.4).

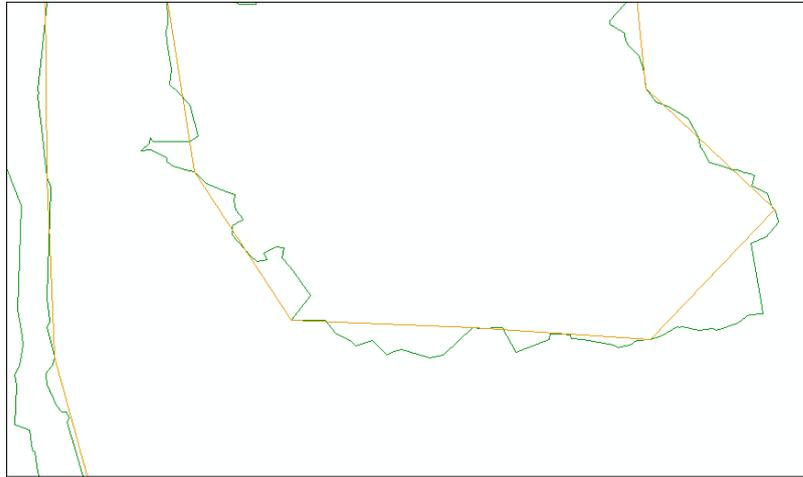


Figura 6.4 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools (em verde), com simplificação de elementos e limpeza de linhas de até 10 m de comprimento, gerando linha simplificada (em marrom).  
Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 6.5 mostra a curva gerada usando simplificação de elementos pequenos, com comprimento de até 5 m, limpeza de linhas curtas de até 15 m e concavidade de 10 m (raio médio de curvatura).

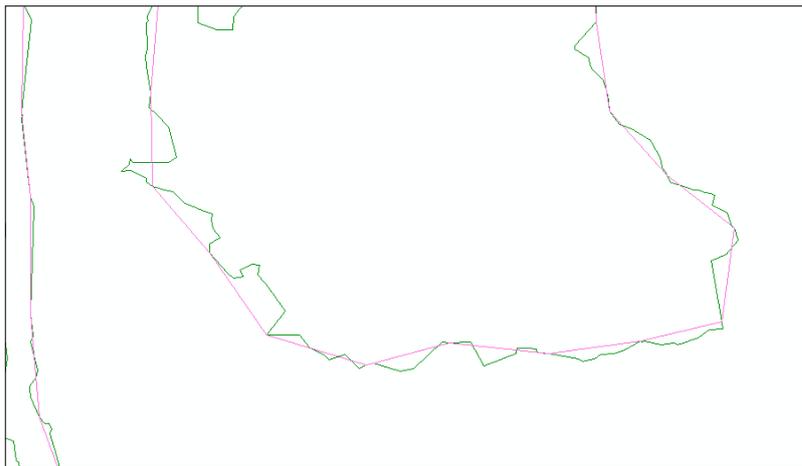


Figura 6.5 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools, com simplificação de elementos de até 5 m, limpeza de linhas de até 15 m de comprimento e concavidade de até 10 m.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Por sua vez a figura 6.6 mostra a curva gerada usando simplificação de elementos pequenos de comprimento até 2 m, limpeza de linhas curtas de até 20 m e

concauidade de 10 m. Esses últimos parâmetros geraram curvas visualmente mais suaves que as demais, e foram assim escolhidos, garantindo em todos os casos que as curvas suavizadas se mantivessem próximas às curvas geradas pelos pontos LiDAR.

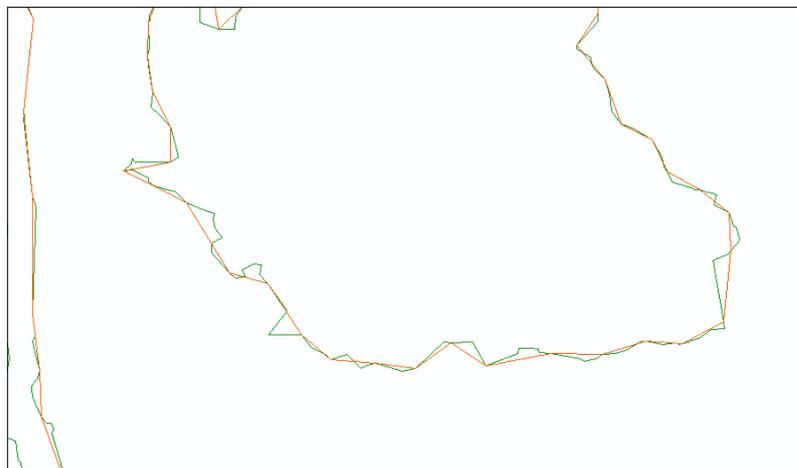


Figura 6.6 - Curva de nível gerada pelo programa LASTools, com os parâmetros escolhidos: simplificação de elementos de até 2 m, limpeza de linhas de até 20 m de comprimento e concauidade de 10 m. Fonte: Elaborado pela autora.

Vale lembrar que, nos processos clássicos, o topógrafo ou desenhista também simplifica e suaviza as curvas de nível visualmente.

### 6.2.2 Curvas de nível de referência

O formato original das curvas de nível da base cartográfica de Campinas (produto de referência) estava no formato *dwg*, e por isso foram editadas e convertidas para o formato *shapfile*, pois a metodologia do trabalho prevê o uso de um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que usa esse formato.

O tempo de execução da edição de cada curva é apresentado na tabela 6.1, podendo-se ver que há um considerável tempo total (13h 30m) de edição manual, mas deve-se ter em conta a magnitude da área e a quantidade e extensão das curvas de nível. Em casos de menor responsabilidade pode-se realizar um teste por amostragem, escolhendo algumas curvas de nível. No presente caso, trata-se de uma tarefa obrigatória, tratando-se de experimento para avaliar o método.

Tabela 6.1 - Tempo de edição das curvas de nível da base cartográfica de Campinas.

Atividade	Tempo (h)
Edição da curva 570	00:30
Edição da curva 580	00:45
Edição da curva 590	01:00
Edição da curva 600	01:20
Edição da curva 610	01:40
Edição da curva 620	01:20
Edição da curva 630	01:20
Edição da curva 640	01:40
Edição da curva 650	01:00
Edição da curva 660	01:00
Edição da curva 670	01:00
Edição da curva 680	00:25
Edição da curva 690	00:15
Edição da curva 700	00:15
Total	13:30

Fonte: Elaborado pela autora.

Tanto as curvas de nível geradas pelos pontos LiDAR no programa LASTools, como as curvas de nível da base cartográfica editadas e convertidas para *shapefile* foram utilizadas nos testes de acurácia altimétrica do presente trabalho apresentados a seguir. Ou seja, serviram como dado de entrada para aplicação de alguns dos métodos propostos.

### **6.3 Primeiro método: avaliação do erro altimétrico dos pontos LiDAR pela adaptação da Norma brasileira – uma aplicação prática**

Uma forma de verificar a acurácia altimétrica dos pontos LiDAR, foco deste trabalho, é converter o conjunto de pontos, classificados como solo pelo padrão ASPRS, para formarem uma rede triangular irregular (TIN) e comparar os valores altimétricos dessa TIN com os valores de controle (pontos com coordenadas conhecidas), realizando uma interpolação na TIN por meio de programa SIG, para obter os pontos homólogos (com mesmas coordenadas planas), conforme o fluxograma da Figura 6.7.

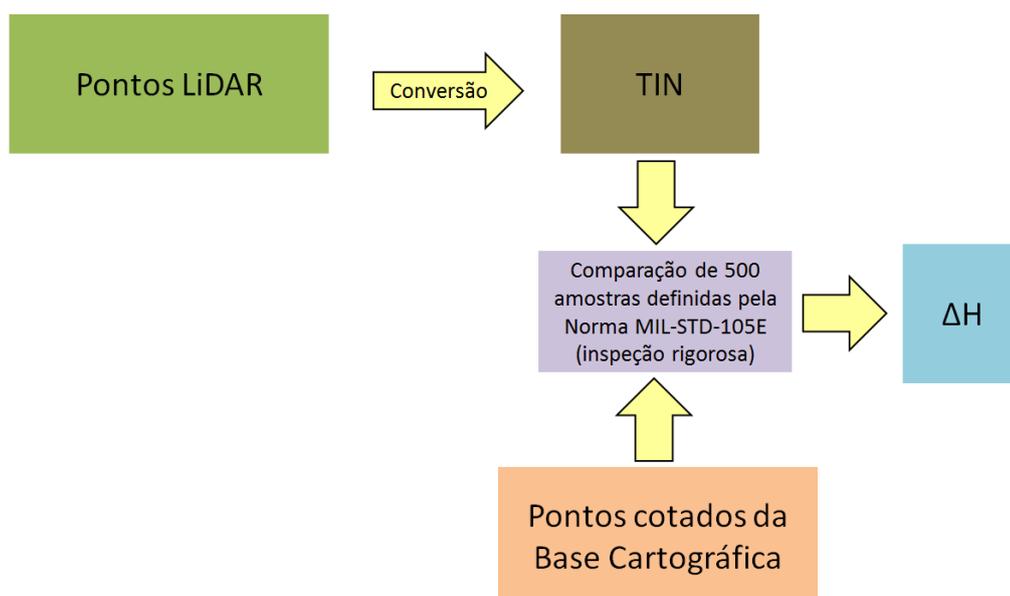


Figura 6.7 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico utilizando a interpolação em uma TIN.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Esse procedimento é simples e requer apenas um programa SIG que disponibilize uma ferramenta para converter o conjunto de dados LiDAR em uma TIN e permita interpolações na mesma. Para o presente trabalho foi utilizado o programa ArcGIS 10.1<sup>©</sup>. O algoritmo do programa calcula o valor da altitude de qualquer ponto localizado na TIN a partir dos valores da altitude dos vértices do triângulo em que o ponto de interesse se localiza, sendo necessário, é claro, fornecer as coordenadas planas de cada ponto.

Os valores das diferenças altimétricas são submetidos a uma análise estatística que, então, revela a precisão e a medida da acurácia do conjunto de dados analisado. Essa análise é feita por analogia com a norma brasileira (Brasil, 1984), complementada por mais dois testes da norma americana: teste t, de tendência e teste Chi-quadrado de precisão. Inspirado em Merchant (1982), Tommaselli, Monico e Camargo (1988), e Galo e Camargo (1994) usaram teste t e teste Chi-quadrado para realizar o controle de qualidade em cartas.

A figura 6.8 apresenta a TIN resultante classificada por intervalos de valores altimétricos, conforme a legenda. Cada triângulo da TIN foi colorido de acordo com as cores pré-determinadas para os intervalos de altimetria.

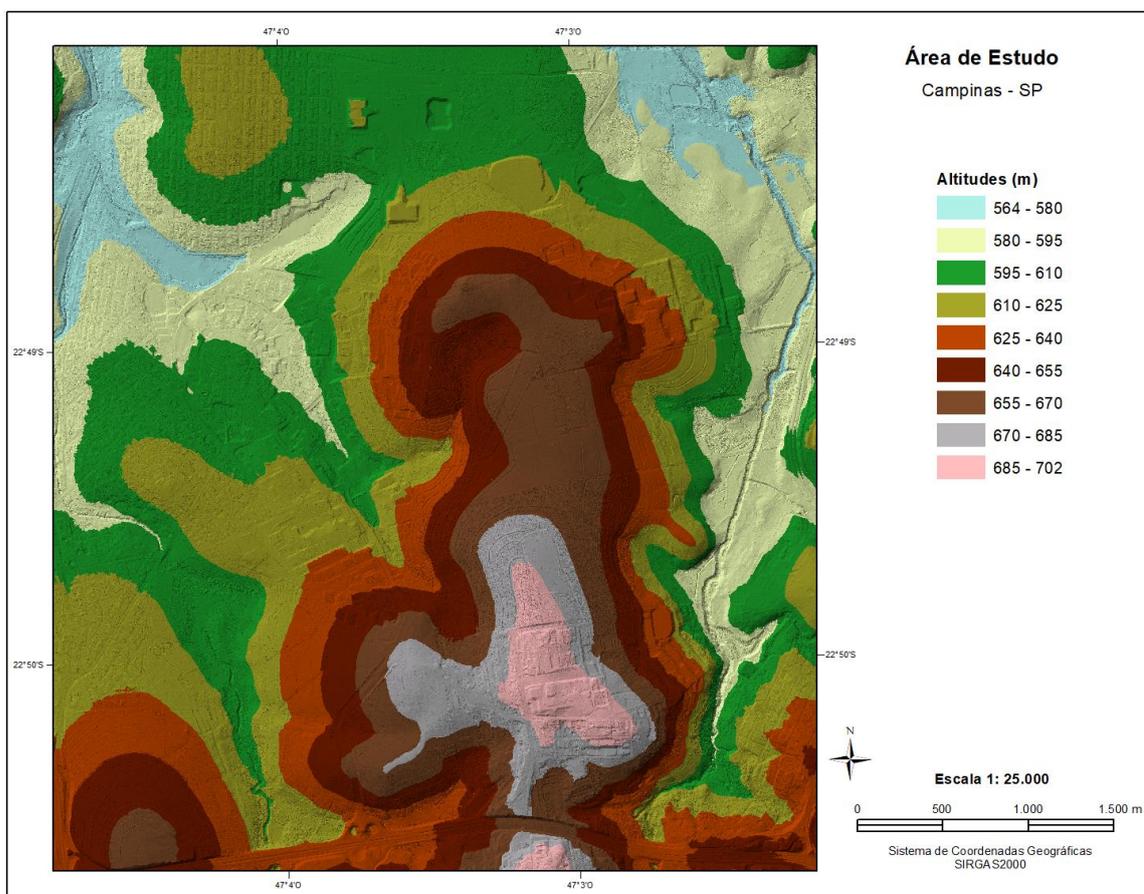


Figura 6.8 - Conjunto dos pontos LiDAR convertidos em uma TIN , com os triângulos colorizados de acordo com a faixa de altitude em que se encontram (ver legenda).

Fonte: Elaborado pela autora.

Disponha-se de 4879 pontos cotados, provenientes da Base Cartográfica de Campinas, que recobriam a área de estudo e poderiam ser usados como dados de referência para analisar a acurácia altimétrica da TIN gerada a partir dos pontos LiDAR. A hipótese é que esses pontos, provenientes de aerofotogrametria possuem precisão suficiente para servir de referência.

Com relação à quantidade de pontos, Nero (2005) realizou um resumo da norma MIL-STD-105E (1989), que apresenta os tipos de padrões de amostragem para realizar um controle de qualidade, de uma forma geral, derivada daquilo que se aplica na indústria siderúrgica (peças industriais).

Pela referida norma, uma amostra de 200 pontos satisfaria uma amostragem simples para atender ao nível de inspeção normal, para a quantidade de pontos presente nessa aplicação. Caso o nível aceitável de qualidade (NAQ) fosse de 1%, o

número de aceitação (Ac) seria 5, ou seja, no lote da amostragem poderiam ser rejeitados no máximo 5 pontos.

Já para atender ao nível de inspeção rigorosa, seria necessária uma amostra de 315 pontos, e para o NAQ de 1%, o número de aceitação (Ac) também seria 5, ou seja, o mesmo valor de inspeção normal.

Para realizar a análise, tendo em conta esses dois limites, decidiu-se coletar valores altimétricos de 500 pontos cotados bem distribuídos espacialmente sobrepondo-os à TIN, como ilustrado no fluxograma da figura 6.7. Esse procedimento foi realizado num programa SIG (ArcGIS 10.1).

A tabela 6.2 mostra, parcialmente, o lote da amostragem. Na primeira coluna, tem-se o identificador do ponto (ID), na segunda e terceira colunas são mostradas as coordenadas UTM leste (E) e norte (N) no Fuso 23S, na quarta coluna é mostrado o valor da altitude ortométrica do ponto cotado da base cartográfica ( $H_{\text{Pto\_Cotado}}$ ), na quinta coluna é mostrado o valor da altitude ortométrica do ponto cotado na TIN ( $H_{\text{TIN}}$ ), e na última coluna é mostrada a diferença entre a quinta e a quarta coluna, ou seja a discrepância entre os valores altimétricos analisados ( $\Delta H$ ). Todas as unidades estão em metros.

O lote completo da amostragem está no Apêndice B.

Tabela 6.2 - Lote de amostragem parcial de 25 pontos de verificação (Coordenadas UTM, Fuso 23S; altitudes ortométricas)

ID	E(m)	N(m)	$H_{\text{Pto\_Cotado}}$ (m)	$H_{\text{TIN}}$ (m)	$\Delta H$ (m)
138	291.040,067	7.473.950,723	622,324	622,322	-0,002
139	291.062,787	7.473.868,931	626,060	626,089	0,029
206	291.034,387	7.473.843,939	623,340	623,237	-0,103
371	291.054,623	7.472.566,919	641,682	641,657	-0,025
372	291.030,979	7.472.502,317	641,376	641,366	-0,010
438	291.055,971	7.472.796,542	638,343	638,396	0,053
442	291.071,875	7.472.729,518	639,936	639,983	0,047
625	290.981,343	7.476.991,201	591,422	591,559	0,137
627	291.080,959	7.476.964,081	590,556	590,550	-0,006
663	291.049,209	7.476.424,330	589,390	589,366	-0,024
664	290.996,292	7.476.876,107	583,230	583,282	0,052
665	290.971,818	7.476.895,289	583,452	583,524	0,072
675	291.053,839	7.476.606,893	585,361	585,404	0,043
678	291.063,761	7.476.521,565	586,231	586,215	-0,016
702	290.985,708	7.476.599,617	585,794	585,729	-0,065
706	291.020,766	7.476.696,190	584,683	584,633	-0,050

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	$\Delta H$ (m)
707	290.994,969	7.476.704,128	584,449	584,495	0,046
708	290.974,464	7.476.755,721	584,034	584,044	0,010
716	291.082,282	7.476.654,518	585,195	585,286	0,091
838	291.075,540	7.475.357,980	588,236	588,274	0,038
1003	291.026,860	7.475.174,250	596,891	596,895	0,004
1138	291.025,299	7.472.327,372	639,713	639,677	-0,036
1176	290.802,642	7.472.277,388	640,372	640,588	0,216
1233	290.680,511	7.476.966,595	583,406	583,385	-0,021
1234	290.691,624	7.477.071,370	586,474	586,441	-0,033

Fonte: Elaborado pela autora.

O lote de amostragem foi retirado de um conjunto de 4879 pontos cotados, e é por isso que apesar de ser uma amostra de 500 pontos, os valores do ID, na primeira coluna, ultrapassam 500, pois manteve-se a numeração original dos pontos, para efeito de controle.

Os valores das diferenças altimétricas (coluna  $\Delta H$ ) foram submetidos a uma análise estatística, resultando nos valores mostrados na tabela 6.3 e na figura 6.9.

Tabela 6.3 - Valores da análise estatística.

Estatística descritiva	
Média (m)	0,018
Erro padrão (m)	0,007
Mediana (m)	0,008
Moda (m)	-0,059
Desvio padrão (m)	0,156
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,024
Curtose	57,585
Média + 3*Desvio padrão (m)	0,486
Média - 3* Desvio padrão (m)	-0,450
Assimetria	1,840
Intervalo (m)	3,298
Mínimo (m)	-1,403
Máximo (m)	1,895
Soma (m)	9,116
Número de amostras	500

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores da curtose e assimetria, fora do intervalo +0,5 e -0,5, preconizados pela teoria, indicam que a amostra não é normal e podem estar ocorrendo erros grosseiros, como se nota pela figura 6.9 (valores acima de 0,48 e abaixo de 0,45 negativo no eixo de  $\Delta H$ , que pouco aparecem devido a sua baixa frequência, os valores das frequências estão acima das barras). A curva de aparência leptocúrtica da distribuição dos erros oferece uma falsa ideia de acurácia.

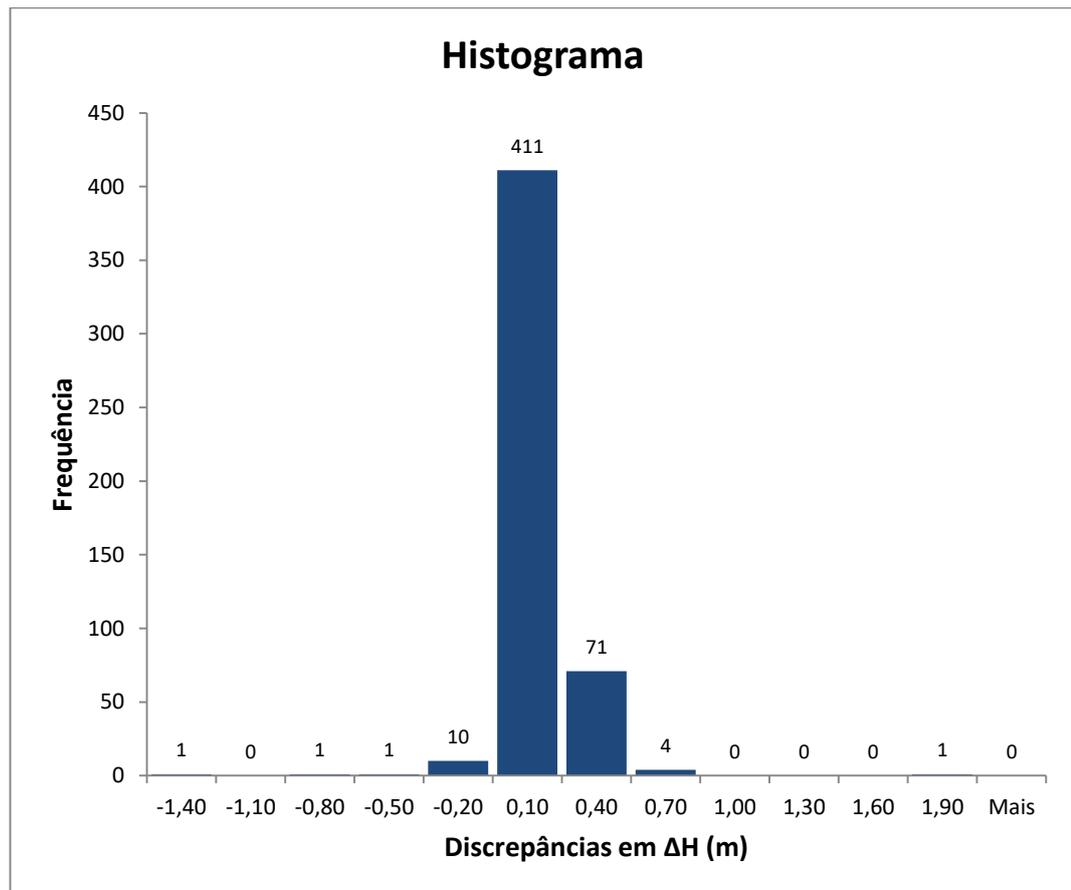


Figura 6.9 - Histograma dos valores dos erros altimétricos para o lote de amostragem. Fonte: Elaborado pela autora.

Da estatística, foram usados os valores da média e do desvio padrão para inspecionar o lote da amostragem. As diferenças altimétricas ( $\Delta$ ) deveriam estar dentro do intervalo determinado pelos valores da média mais/menos três vezes o desvio padrão, pela estatística. O que está fora desse intervalo pode ser considerado como outlier ou erro grosseiro, como se indicou no desenvolvimento teórico.

No lote da amostragem, havia 4 valores ( $\Delta H$ ) acima e 2 valores abaixo do referido intervalo, embora seja difícil notar a ocorrência desses valores no histograma da figura 6.9, devido à baixa frequência dos mesmos.

Os 6 valores fora do intervalo (o que corresponde a 1,2% da amostra) são mostrados na tabela 6.4. Eles foram inspecionados por análise visual sobre as ortofotos e, em função da constatação de problemas, foram excluídos. A análise de cada um é feita no Apêndice C.

Tabela 6.4 - Análise visual dos 6 pontos fora do intervalo aceitável.

ID	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	Δ (m)	Identificação Visual
2757	595,102	595,650	0,548	terreno natural com vegetação
3292	699,451	699,980	0,529	rua pavimentada
4839	610,733	609,330	-1,403	via pavimentada
4903	597,104	598,999	1,895	área de mineração
5054	653,300	652,493	-0,807	terreno natural com vegetação
6805	577,500	578,092	0,592	terreno natural com vegetação

Fonte: Elaborado pela autora.

Procedeu-se a um novo cálculo da estatística descritiva para o lote da amostragem, tabela 6.5. Observa-se que o valor de curtose obtido pelo programa de cálculo Excel ( $K = 2,681$ ) diminuiu muito, mas continua indicando uma distribuição leptocúrtica, mais afinada do que a curva normal, significando que a precisão (medida pelo desvio padrão) está superestimada. O valor da assimetria ( $S_a = 0,392$ ) está no intervalo ( $-0,5 \leq S_a \leq 0,5$ ) o que é considerado uma distribuição aproximadamente simétrica, pela estatística clássica (BULMER, 1979). Com isso, os resultados melhoraram muito com relação à estatística anterior e os dados podem ser utilizados para as análises. A média, não tanto, de 0,018 para 0,017 m, mas o desvio padrão caiu de 0,156 para 0,096 m.

Tabela 6.5 - Nova análise estatística do lote de amostragem.

Estatística descritiva	
Média (m)	0,017
Erro padrão (m)	0,004
Mediana (m)	0,008
Moda (m)	-0,059
Desvio padrão (m)	0,096
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,009
Curtose	2,681
Média + 3*Desvio padrão (m)	0,306
Média - 3* Desvio padrão (m)	-0,273
Assimetria	0,392

Intervalo (m)	0,732
Mínimo (m)	-0,334
Máximo (m)	0,398
Soma (m)	8,285
Número de amostras	494

Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 6.10 mostra o histograma das diferenças altimétricas dos pontos cotados e da TIN. A média desse lote de amostragem ficou abaixo de 20 cm, como se vê pela primeira linha da tabela apresentada.

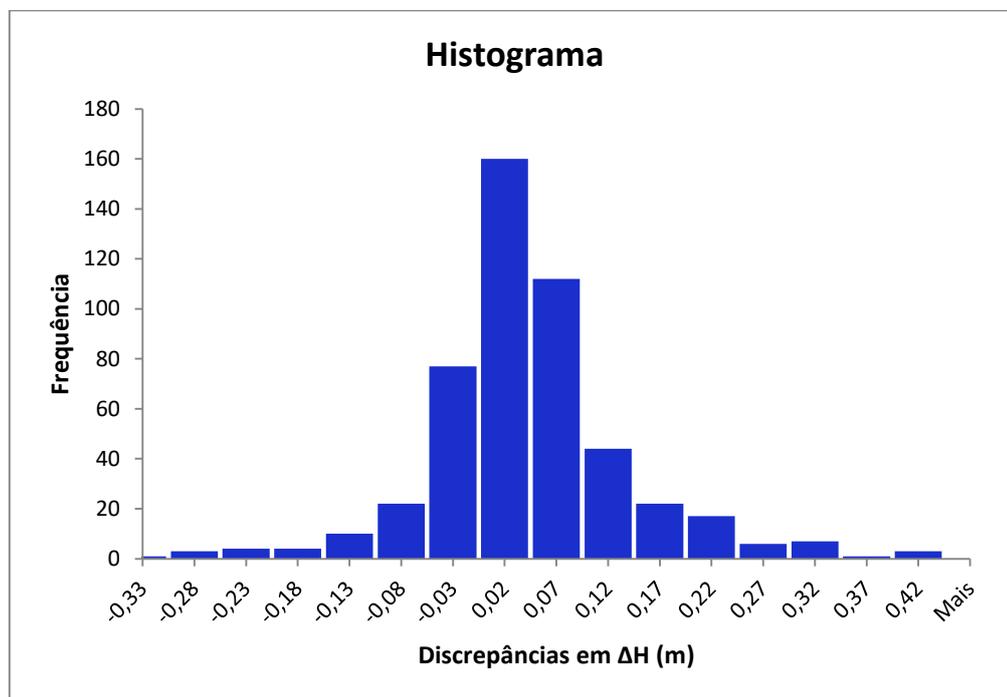


Figura 6.10 - Histograma dos valores de  $\Delta H$  para o lote de amostragem após a exclusão dos erros grosseiros. Fonte: Elaborado pela autora.

A norma brasileira de controle de qualidade não pede um teste de tendência, nem um teste de precisão dos erros. De qualquer forma, foram aplicados para verificação.

O teste de tendência (teste t para pequenas amostras e teste Z para grandes amostras), revela se há existência de erros sistemáticos na amostra. O teste foi realizado seguindo a fórmula (8), tal como apresentado em mais detalhe por Cintra e Nero (2015):

$$Z_H = \frac{1}{EP} \times \mu \times \sqrt{n} \quad (8)$$

Onde:

$Z_H$  = O valor de  $Z$  calculado

EP = S = Desvio padrão da amostra ( $\sigma$  - Sigma)

$\mu$  = média da amostra

$n$  = número de amostras

O valor calculado de  $Z_H$  é comparado com o valor obtido de uma tabela estatística  $Z_{(1-\alpha/2)}$ . Esse valor teórico depende do tamanho da amostra e do nível de significância ( $\alpha$ ), que é tradicionalmente tomado como 0,10 (nível de confiança de 0,90) e foi adotado no presente trabalho (Cintra e Nero, 2015).

Da tabela estatística (ou valor calculado):

$$Z_{(1-\alpha/2)} = Z_{0,95} = 1,644853$$

Se  $|Z_H| > Z_{0,95}$ , existe erro sistemático na componente H;

Se  $|Z_H| < Z_{0,95}$ , não existe erro sistemático na componente H.

$$|Z_H| = \frac{1}{0,096} \times 0,017 \times \sqrt{494} = 3,935$$

$|Z_H| > Z_{0,95}$ , e portanto, existe erro sistemático na componente H.

Para eliminar a tendência, basta subtrair a média da amostra (0,017 m) dos valores altimétricos das 494 amostras.

O teste de precisão – ver Cintra e Nero (2015) – com a finalidade de saber se o lote de amostragem atende à norma brasileira de controle de qualidade, é realizado pela fórmula (9). Para realizar esse teste, o valor de  $X_{H,n-1}^2$  da amostra deve ser comparado com um valor limite calculado  $X_{n-1,\alpha}^2$  para um certo tamanho da amostra ( $n$ ) e um nível de confiança, que geralmente é de 90% (correspondendo a  $\alpha = 0,10$ ) (Cintra e Nero, 2015).

$$X_{H,n-1}^2 = (n - 1) \times \frac{S_H^2}{\sigma_H^2} \quad (9)$$

Onde:

$X_{H,n-1}^2 = X^2$  calculado para o lote de amostragem

$n$  = número de amostras

$S_H^2$  = o quadrado do desvio padrão da amostra

$\sigma_H^2$  = o quadrado do erro padrão da classe de mapeamento que se deseja testar

Para o valor de  $\sigma_H$  da classe A do PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para os Produtos Cartográficos Digitais), escala 1:1.000, cujo valor é 0,17 m:

$$X_{H,n-1}^2 = (494 - 1) \times \frac{(0,096)^2}{(0,17)^2} = 157,214$$

Se  $X_{H,n-1}^2 \leq X_{n-1,\alpha}^2$ , a amostra atende a acurácia desejada;

Se  $X_{H,n-1}^2 > X_{n-1,\alpha}^2$ , a amostra não atende a acurácia desejada.

$X_{n-1,\alpha}^2$  geralmente aparece em tabelas até o valor correspondente a  $n - 1$  (graus de liberdade) igual a 120. Para calcular valores acima desse limite, usa-se a fórmula (10) de Wilson–Hilferty, como se vê em Zar (1978) ou Cintra e Nero (2015). Essa fórmula foi utilizada porque o número de amostras testado ( $n$ ) foi de 494.

$$X_{n-1,\alpha}^2 = df \times (1 - p + z \times \sqrt{p})^3 \quad (10)$$

Onde:

$df = n - 1$  (graus de liberdade)

$p = \frac{2}{9 \times df}$  (variável auxiliar)

$z = -1,645$  (valor da curva normal com a mesma área de  $\alpha = 0,10$ , à direita)

O valor limite é calculado usando a fórmula (10):

$$X_{n-1,\alpha}^2 = X_{493,0,1}^2 = 442,508$$

Como,  $X_{H,n-1}^2 \leq X_{n-1,\alpha}^2$ , então, a amostra atende a acurácia desejada.

Fazendo uma avaliação final, pode-se dizer que este método consiste na aplicação da norma brasileira (BRASIL, 1984), que utiliza Merchant (1982) como referência, com a novidade de tomar uma amostra bem maior e, portanto, mais confiável do que aquilo que preconiza Merchant (1982), que adota 20 pontos de verificação por carta e não ao mapeamento como um todo (considerado contínuo). A outra contribuição do método é a sugestão de utilizar os pontos cotados como referência e utilizar a TIN para interpolar a cota no MDT LiDAR, nas mesmas coordenadas horizontais dos pontos cotados. Caso se tivesse dúvida sobre a qualidade dos pontos cotados se poderia fazer uma avaliação dos 500 pontos, através de uma amostragem, com checagem com GPS.

#### **6.4 Segundo método: baseado na metodologia do padrão NDEP – uma aplicação prática**

Escolheu-se, como um dos métodos para testar a acurácia altimétrica do LiDAR aquele preconizado pelo Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program* – NDEP), que normatiza as especificações para a obtenção da acurácia altimétrica dos produtos obtidos pela tecnologia LiDAR. Essa metodologia foi utilizada para testar a área de estudo e ao final é comparada com os resultados das outras metodologias.

Para satisfazer a exigência da norma NDEP, os pontos coletados devem estar em solo nu, areia, pedra, argila, campos arados, gramados ou campos de futebol a fim de obter a acurácia altimétrica fundamental. Segundo a norma NDEP, somente a acurácia altimétrica dos pontos coletados em solo nu pode ser avaliada segundo um padrão de distribuição normal. Os pontos coletados em áreas florestadas, arbustivas, campos agrícolas, capinzal, mangue ou área urbana, devem ser avaliados utilizando a função estatística percentil 95.

Para realizar a seleção e coleta seguiu-se a metodologia apresentada na seção 3.3.3, de que os pontos de controle estivessem espaçados a intervalos de, pelo menos, 10% da distância diagonal do retângulo envolvente do conjunto de dados e, pelo menos, 20% dos pontos estivessem localizados em cada quadrante do conjunto de dados.

Decidido o critério de seleção, foram coletados os valores altimétricos da TIN, obtida com os pontos classificados como solo nu, nos mesmos locais (mesmas coordenadas planas) dos pontos cotados da base cartográfica. Foram 30 pontos com um espaçamento médio aproximado de 680 m e, com pelo menos 6 amostras em cada quadrante da área de estudo. Os quadrantes 3 e 4 tinham mais pontos que satisfaziam aos critérios de seleção do que os quadrantes 1 e 2, e, por isso, neles coletaram-se 9 amostras em cada um.

A figura 6.11 mostra o fluxograma da metodologia empregada no experimento de avaliação da acurácia altimétrica do NDEP. Converteu-se o conjunto de pontos, classificados como solo nu pelo padrão ASPRS, para uma rede triangular irregular (TIN) e compararam-se os valores altimétricos dos pontos cotados provenientes da base cartográfica de Campinas com os valores altimétricos dos pontos homólogos (mesmas coordenadas horizontais) interpolados na TIN por meio de programa SIG.

Com isso foi possível obter a acurácia vertical fundamental (AVF), a acurácia vertical suplementar (AVS), e a acurácia vertical consolidada (AVC).

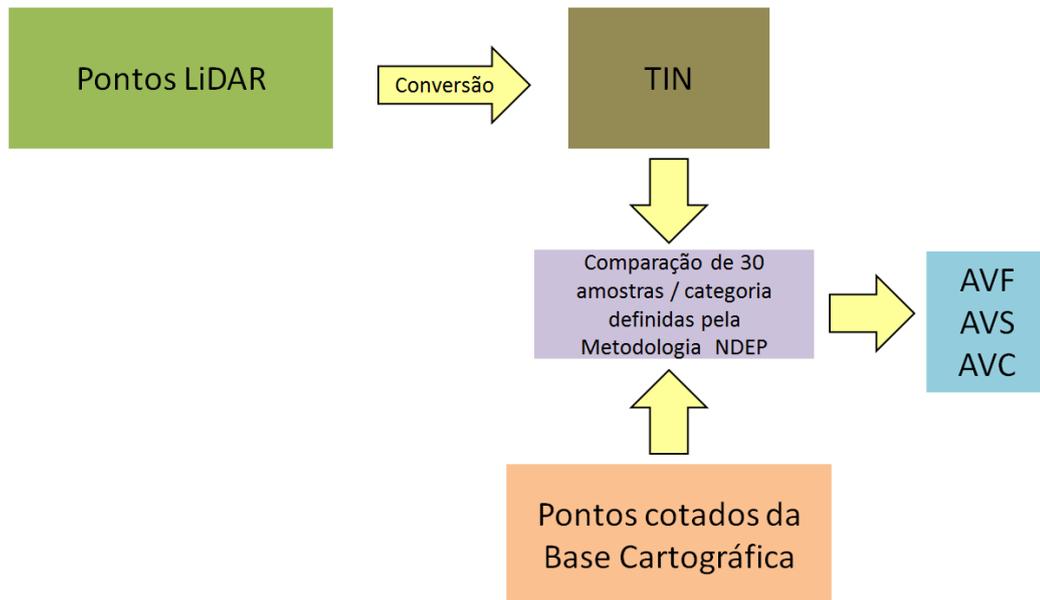


Figura 6.11 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico utilizando a metodologia do NDEP.  
Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 6.6 mostra os dados coletados para realizar os cálculos da acurácia altimétrica fundamental.

Tabela 6.6 - Amostras para a acurácia altimétrica fundamental em solo nu.  
(Coordenadas UTM, Fuso 23S; altitudes ortométricas)

	ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH (m)
1º Quad.	5351	288.307,480	7.476.972,965	602,494	602,433	-0,061
	4998	288.463,499	7.476.177,247	600,738	600,714	-0,024
	5751	288.050,146	7.475.595,269	600,378	600,399	0,021
	6037	287.497,324	7.475.562,831	583,160	583,180	0,020
	6751	286.694,859	7.476.415,322	570,444	570,392	-0,052
	6261	287.160,970	7.475.589,214	584,672	584,672	0,000
2º Quad.	6375	287.042,728	7.474.215,954	596,928	596,932	0,004
	6129	287.606,066	7.474.154,975	619,045	619,073	0,028
	5843	288.298,747	7.474.192,369	622,256	622,240	-0,016
	5456	288.112,971	7.473.441,840	638,619	638,630	0,011
	5214	288.349,747	7.472.832,307	661,544	661,543	-0,001
	6156	287.539,812	7.472.898,876	619,131	619,142	0,011
3º Quad.	4369	289.020,488	7.474.613,963	643,030	643,032	0,002
	3093	289.701,809	7.474.443,289	660,907	660,937	0,030
	2592	290.428,409	7.474.245,777	591,074	591,098	0,024

	ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH (m)
	1752	290.963,025	7.473.888,887	618,630	618,629	-0,001
	2635	290.448,006	7.473.676,614	589,604	589,615	0,011
	3122	289.647,286	7.473.742,290	674,899	674,922	0,023
	4395	289.053,695	7.473.673,131	654,551	654,604	0,053
	4512	289.313,068	7.473.323,549	693,582	693,573	-0,009
	3343	289.710,803	7.472.905,705	677,183	677,187	0,004
4º Quad.	4309	289.071,580	7.474.722,500	645,804	645,823	0,019
	3952	289.701,960	7.474.831,870	660,446	660,439	-0,007
	2464	290.234,310	7.474.977,030	604,982	604,993	0,011
	1421	290.744,850	7.475.839,560	585,634	585,636	0,002
	3785	289.762,920	7.475.784,050	629,820	629,816	-0,004
	4218	289.189,160	7.476.218,510	614,250	614,280	0,030
	4152	289.021,702	7.476.841,187	606,222	606,221	-0,001
	3685	289.551,796	7.476.945,957	597,303	597,283	-0,020
	3067	290.144,694	7.476.990,967	577,626	577,614	-0,012
					Média	0,003
					Desvio padrão	0,023

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o cálculo da acurácia altimétrica fundamental (Acurácia<sub>H</sub>), foram usadas as fórmulas (6) e (7), conforme especifica a norma do NDEP e descrito na seção 4.4.2.

O resultado da acurácia altimétrica fundamental (RMSE<sub>H</sub>) foi de 0,046 m, e a declaração opcional no relatório seria: “Produzido para atender a uma acurácia altimétrica fundamental de 0,046 m, ao nível de confiança de 95% em terreno aberto usando RMSE<sub>H</sub> x 1,9600”.

O NDEP orienta que sejam calculados os valores de acurácia altimétrica suplementares para outras categorias de cobertura do solo, tais como: a) macega e culturas; b) terrenos arbustivos e árvores baixas; c) áreas florestadas totalmente cobertas por árvores; e d) áreas urbanas com densas estruturas feitas pelo homem.

Para calcular a acurácia suplementar, como se apontou na teoria, é empregado o percentil 95, porque os erros altimétricos geralmente variam com a altura e a densidade de cobertura do solo, principalmente nas coberturas vegetadas, e conseqüentemente, não se pode esperar uma distribuição normal de erro para esses casos, como enfatiza a norma americana que se está seguindo.

Na área de estudo, encontrou-se certa dificuldade de coletar e selecionar amostras para as quatro categorias de cobertura do solo, ou porque o número de amostras seria

insuficiente para cada categoria, ou porque a distância entre as amostras não satisfaria a orientação do NDEP.

Então foram colhidas amostras para a categoria a) dos terrenos arbustivos e árvores baixas e b) para a categoria das áreas urbanas. As tabelas 6.7 e 6.8 mostram os dados coletados para realizar os cálculos da acurácia altimétrica suplementar dessas duas categorias.

Tabela 6.7 - Amostras para a acurácia altimétrica suplementar em terrenos arbustivos e/ou com árvores baixas. (Coordenadas UTM, Fuso 23S; altitudes ortométricas)

	ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto. Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	Δ (m)
1º Quad.	6512	286.763,294	7.476.670,999	567,499	567,394	-0,105
	5623	287.808,863	7.477.114,283	607,600	607,324	-0,276
	5698	288.225,876	7.476.253,394	591,200	591,134	-0,066
	6097	287.574,166	7.475.048,982	600,668	600,665	-0,003
	6834	286.534,679	7.475.219,947	580,300	580,625	0,325
	6021	287.269,448	7.475.709,310	575,658	575,653	-0,005
2º Quad.	5149	288.758,925	7.474.028,584	637,689	637,755	0,066
	5472	287.993,498	7.472.404,677	621,235	621,468	0,233
	5477	287.866,235	7.472.565,121	612,247	612,278	0,031
	5464	287.878,803	7.472.424,230	613,272	613,561	0,289
	5474	287.970,415	7.472.439,774	618,101	618,158	0,057
	5150	288.765,891	7.473.996,405	637,407	637,439	0,032
3º Quad.	3106	289.453,108	7.474.175,281	674,519	674,518	-0,001
	1685	290.965,669	7.474.085,722	611,201	611,186	-0,015
	1810	290.530,345	7.473.492,102	590,756	591,075	0,319
	3118	289.596,437	7.473.740,906	680,218	680,243	0,025
	5166	288.855,423	7.473.676,096	647,961	648,923	0,962
	2772	290.374,931	7.473.198,797	617,271	617,201	-0,070
	3341	289.645,486	7.472.917,397	675,790	675,850	0,060
4º Quad.	3043	290.306,044	7.476.990,352	577,470	577,464	-0,006
	665	290.972,272	7.476.896,223	583,452	583,490	0,038
	2073	290.247,681	7.476.699,743	575,284	575,511	0,227
	4260	288.993,733	7.475.146,535	643,998	644,003	0,005
	4298	288.927,572	7.474.892,606	635,865	635,863	-0,002
	3970	289.549,777	7.474.799,540	667,393	667,529	0,136
	2401	290.426,401	7.475.005,700	601,497	601,313	-0,184
					Média	0,079
				Desvio padrão	0,230	

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6.8 - Amostras para a acurácia altimétrica suplementar em áreas urbanas.  
(Coordenadas UTM, Fuso 23S; altitudes ortométricas)

	ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	Δ (m)
1º Quad.	6494	286.590,534	7.477.107,001	587,872	587,971	0,099
	5907	287.305,182	7.476.977,521	609,900	610,067	0,167
	5613	288.055,105	7.476.952,128	603,781	603,787	0,006
	4807	288.654,767	7.476.704,971	604,365	604,378	0,013
	5677	287.895,411	7.476.628,456	611,178	611,190	0,012
	5718	287.858,009	7.475.968,235	584,598	584,610	0,012
	6112	287.723,537	7.475.156,571	597,252	597,296	0,044
2º Quad.	6365	286.733,047	7.474.522,918	597,479	597,489	0,010
	6118	287.440,824	7.474.482,670	615,231	615,258	0,027
	5833	288.170,083	7.474.454,823	611,904	611,900	-0,004
	5139	288.443,882	7.474.000,440	631,578	631,567	-0,011
	5187	288.381,677	7.473.306,150	657,490	657,514	0,024
	6428	286.963,081	7.473.347,692	622,184	622,181	-0,003
	6653	286.609,712	7.472.486,356	637,353	637,359	0,006
3º Quad.	122	291.048,308	7.474.479,224	598,572	598,642	0,070
	1702	290.794,030	7.474.065,164	597,160	597,149	-0,011
	2705	289.961,836	7.473.731,027	645,219	645,223	0,004
	4460	289.285,736	7.473.586,088	688,468	688,441	-0,027
	4546	288.951,194	7.472.957,450	659,306	659,916	0,610
	3368	289.632,123	7.472.879,972	674,334	674,337	0,003
	2017	290.732,448	7.472.842,083	622,804	622,808	0,004
	2939	290.307,873	7.472.323,173	639,649	639,661	0,012
4º Quad.	4160	289.018,981	7.476.918,821	605,789	605,760	-0,029
	3688	289.690,886	7.476.971,694	589,677	589,585	-0,092
	2095	290.106,266	7.476.818,219	578,126	578,116	-0,010
	1275	290.839,732	7.476.690,600	588,230	588,233	0,003
	2230	290.415,769	7.475.820,340	599,516	599,492	-0,024
	3898	289.913,414	7.475.452,047	641,344	641,314	-0,030
	1553	290.897,440	7.474.849,161	594,280	594,243	-0,037
	2379	289.942,720	7.475.322,899	641,259	641,232	-0,027
					Média	0,027
					Desvio padrão	0,119

Fonte: Elaborado pela autora.

Aplicando-se a função estatística percentil 95<sup>26</sup>, disponível, por exemplo, no programa Excel, para os erros altimétricos na região dos terrenos arbustivos e árvores baixas, chegou-se ao valor de 0,324 m. Já o valor do percentil 95 no lote das áreas urbanas foi de 0,136 m. Em cada um dos dois lotes houve dois erros acima do valor do percentil 95.

Para determinar a acurácia altimétrica consolidada, foram utilizados os valores dos erros altimétricos dos três lotes de amostragem de forma combinada, e o valor do percentil 95 obtido foi de 0,275 m.

O resumo da avaliação da acurácia altimétrica, seguindo a norma NDEP, é apresentado na tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Resumo da acurácia altimétrica seguindo a norma NDEP.

<b>Categoria de Cobertura do Solo</b>	<b>Nº pontos amostrais</b>	<b>AVF - Acurácia Vertical Fundamental (RMSE)</b>	<b>AVS - Acurácia Vertical Suplementar (Percentil 95)</b>	<b>AVC - Acurácia Vertical Consolidada (Percentil 95)</b>
Áreas abertas	30	4,6 cm	-	-
Terrenos arbustivos/ árvores baixas	26	-	32,4 cm	-
Áreas urbanas	30	-	13,6 cm	-
Total combinado	86	-	-	27,5 cm

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores obtidos estão dentro do esperado: baixo para terreno nu / áreas abertas (menos de 5 cm); médio para áreas urbanas (menos de 14 cm) e relativamente alto para terrenos arbustivos (mais de 30 cm).

Esses valores diferenciados mostram que é útil fazer a distinção, pois um produto com 27,5 cm de erro (no conjunto) pode não ser adequado para determinada finalidade que exija tomar pontos de referência desse conjunto, mas, ao se tomar o cuidado de só tomar pontos de referência em solo nu (precaução que normalmente se toma), o erro é de 4,6 cm, o que é um valor admissível para muitas aplicações.

<sup>26</sup> No lote de áreas urbanas em que foram tomadas 30 amostras, o Percentil 95 corresponde a 28 valores amostrais. No lote dos terrenos arbustivos/árvores baixas em que foram tomadas 26 amostras, o Percentil 95 corresponde a 25 valores amostrais.

Na norma da ASPRS (2014) a acurácia altimétrica não é classificada nesses três grupos: fundamental, suplementar e consolidada. Para terreno sem vegetação, como áreas abertas ou urbanas, a acurácia é calculada pelo RMSE e classificada como NVA (*Non-vegetated Vertical Accuracy*). Para terreno com vegetação, a acurácia é calculada pelo percentil 95 e classificada como VVA (*Vegetated Vertical Accuracy*). A acurácia altimétrica consolidada não é utilizada nessa nova norma. A classificação da mesma amostra em questão, segundo a norma da ASPRS (2014) é mostrada na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Resumo da acurácia altimétrica segundo a norma ASPRS (2014).

<b>Categoria de Cobertura do Solo</b>	<b>Nº pontos amostrais</b>	<b>NVA (RMSE)</b>	<b>VVA (Percentil 95)</b>
Áreas abertas	30	4,6 cm	-
Terrenos arbustivos/ árvores baixas	26	-	32,4 cm
Áreas urbanas	30	23,5 cm	-

NVA – Acurácia altimétrica de terrenos sem vegetação

VVA – Acurácia altimétrica de terrenos com vegetação

Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença entre as duas classificações se evidenciou na categoria de áreas urbanas. Na norma do NDEP a acurácia altimétrica foi obtida pelo cálculo do Percentil 95 (13,6 cm) e na norma da ASPRS ela foi obtida pelo cálculo do RMSE (23,5 cm). A acurácia que dá mais garantia ao usuário é a da ASPRS (2014).

Como complemento à metodologia do NDEP, sugere-se realizar a estatística descritiva a fim de visualizar a distribuição dos dados, e perceber se ocorrem valores muito distantes da média / erros grosseiros.

Aplicando uma estatística descritiva aos dados, chegou-se aos resultados da tabela 6.11. O histograma de distribuição das diferenças é mostrado na figura 6.12.

Tabela 6.11 - Análise estatística

Média (m)	0,035
Erro padrão (m)	0,016
Mediana (m)	0,004
Moda (m)	0,004
Desvio padrão (m)	0,147
Média + 3* Desvio padrão (m)	0,475
Média - 3* Desvio padrão (m)	-0,406
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,022
Curtose (m)	20,892
Assimetria (m)	3,874
Intervalo (m)	1,238
Mínimo (m)	-0,276
Máximo (m)	0,962
Soma (m)	2,989
Número de amostras	86

Fonte: Elaborado pela autora.

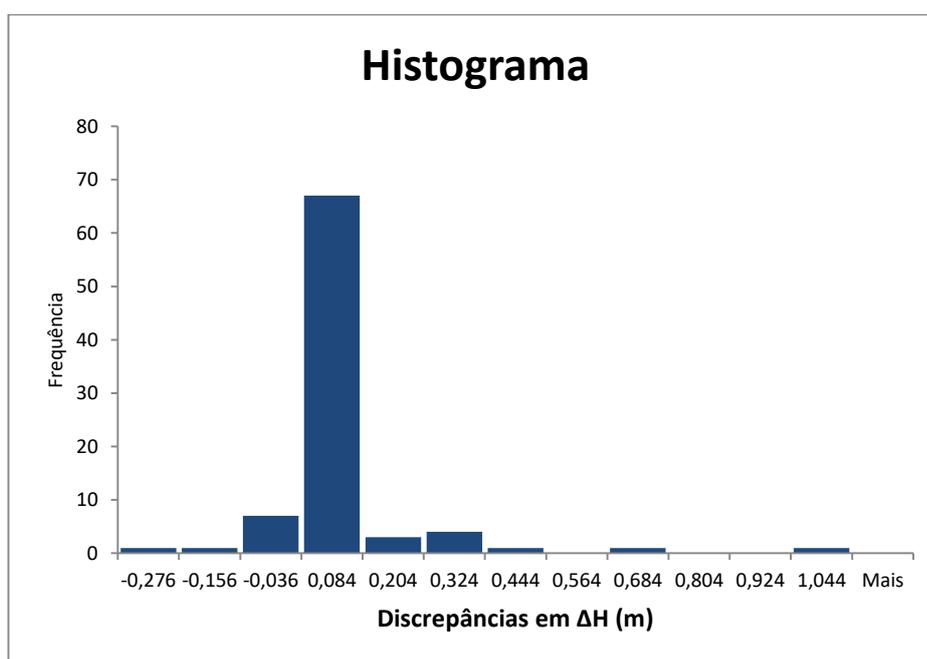


Figura 6.12 - Histograma dos valores de  $\Delta H$  para o lote de amostragem.

Fonte: Elaborado pela autora.

O intervalo aceitável para os dados, para essa quantidade, pode ser definido pelo valor da média mais/menos três vezes o valor do desvio padrão, que seria entre -0,406 m e 0,475 m. A tabela da estatística descritiva e o histograma mostram que existem dados com valores acima do intervalo aceitável (2 valores acima de 0,475 m).

Um dos valores acima do intervalo aceitável (0,61 m) corresponde ao lote de área urbana. O outro valor (0,962 m) corresponde ao lote de terreno arbustivo. Estes dois valores considerados erros grosseiros devem ser eliminados.

Aplicando uma nova estatística descritiva aos dados, após retirar os erros grosseiros, chega-se aos resultados da tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Nova análise estatística

Média (m)	0,017
Erro padrão (m)	0,009
Mediana (m)	0,004
Moda (m)	-0,001
Desvio padrão (m)	0,086
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,007
Curtose (m)	5,713
Assimetria (m)	1,225
Intervalo (m)	0,601
Mínimo (m)	-0,276
Máximo (m)	0,325
Soma (m)	1,417
Número de amostras	84

Fonte: Elaborado pela autora.

O histograma da figura 6.13 mostra a distribuição dos dados, em que se verifica uma alta curtose, já explicitada pelo cálculo. A maior concentração dos dados (85%) ficou entre os valores -0,07 m e 0,07 m, o que significa que 85% dos dados estão dentro de uma precisão de 7 cm.

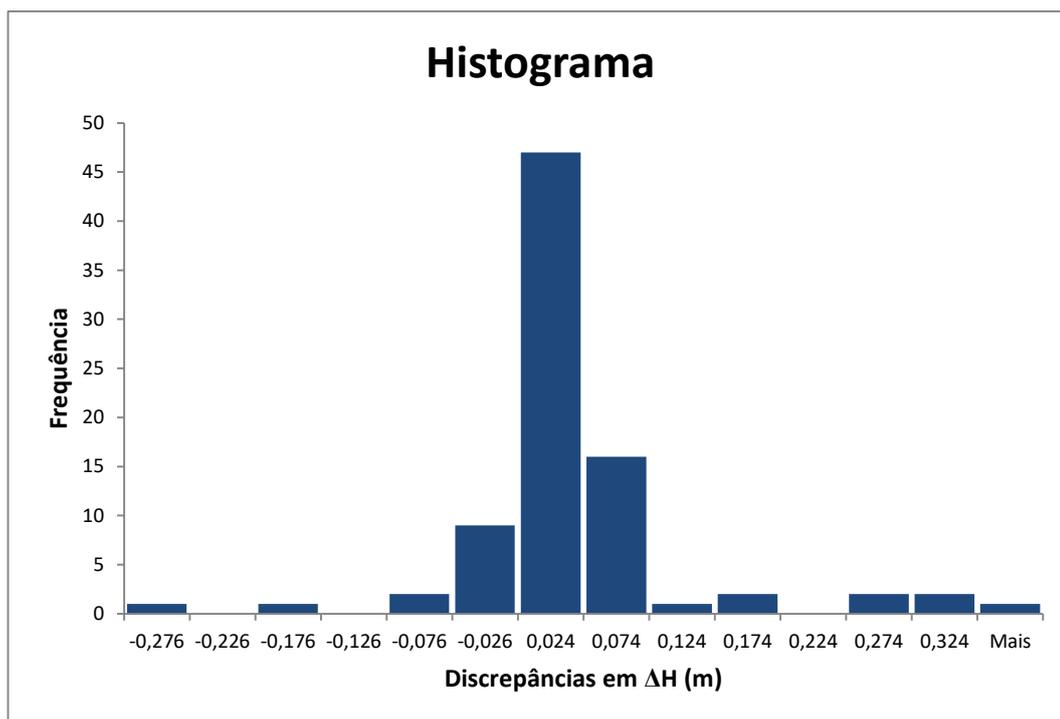


Figura 6.13 - Histograma dos valores de  $\Delta H$  para o lote de amostragem.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Por esse exemplo, sugere-se a adoção da norma NDEP para o Brasil, com as devidas atualizações feitas pela ASPRS (2014), acrescentando o complemento de uma análise estatística, por fazer interessante distinção de tipos de cobertura de terrenos e uma análise estatística geral dos erros altimétricos. No Apêndice D encontra-se uma proposta nesse sentido.

### 6.5 Terceiro método: quantificação da discrepância entre curvas de nível – proposta e aplicação

O terceiro método é a primeira proposta deste trabalho. Ele consiste numa forma de avaliar a acurácia altimétrica das curvas de nível obtidas a partir de pontos LiDAR, empregando-se o Método dos Retângulos Equivalentes (MRE), que é um método já conhecido, desenvolvido por Ferreira e Cintra (1999) na Escola Politécnica (no programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes), mas caracterizando uma nova aplicação.

O Método dos Retângulos Equivalentes consiste em determinar os lados de um retângulo equivalente a duas curvas próximas, a partir das duas grandezas derivadas: área e perímetro. A área e o perímetro são indicadores que servem como medida do

afastamento entre duas feições lineares. As dimensões dos retângulos equivalentes e, em particular seu lado menor, são utilizadas como estimadores das discrepâncias entre as representações de uma dada feição (FERREIRA e CINTRA, 1999).

Para facilitar a compreensão do MRE (Método dos Retângulos Equivalentes), a figura 6.14 apresenta um desenho esquemático. Em a) estão representadas duas feições lineares correspondentes; em b) o polígono obtido pela união das duas linhas originais formando uma área e um perímetro; em c) o retângulo equivalente com as dimensões de comprimento e largura correspondendo, respectivamente, ao comprimento retificado e ao afastamento entre as feições originais.

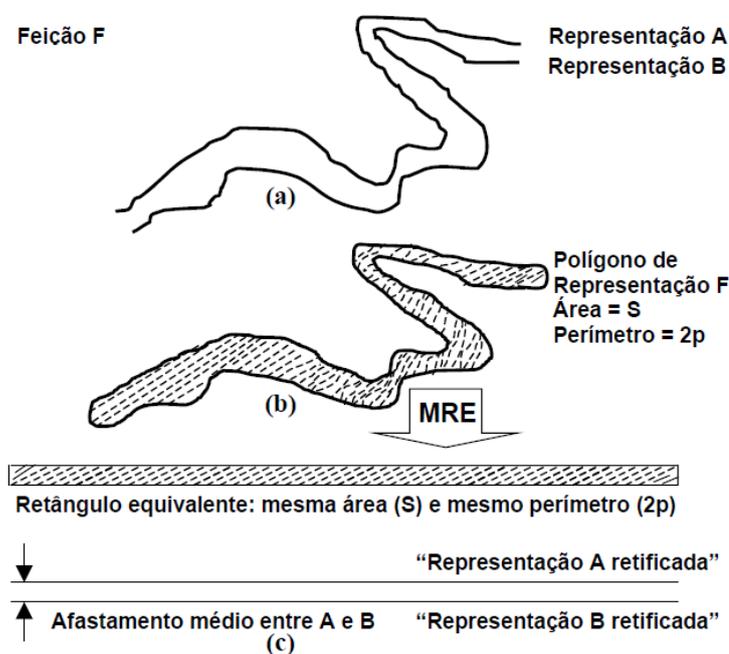


Figura 6.14 - O retângulo equivalente.  
Fonte: Ferreira (1999) apud Maia (2003).

As duas feições associadas são a curva de nível gerada pelo produto LiDAR e aquela proveniente de um levantamento oficial, ou validado, que pode ser usada como um produto de referência para avaliar os dados altimétricos.

O fluxograma dessa metodologia está ilustrado na figura 6.15. Nesse experimento, decidiu-se testar a acurácia altimétrica das curvas de nível interpoladas pelos pontos LiDAR, cujo processamento foi apresentado na seção 6.2.1. O procedimento para esse experimento resumiu-se em sobrepor as curvas de nível procedentes da base cartográfica e suas homólogas, procedentes da interpolação de pontos LiDAR, ou seja, duas curvas de mesmo valor altimétrico, com diferentes

traçados. Onde as curvas não coincidiram formaram-se pequenas áreas ou polígonos (adotando o conceito do Método dos Retângulos Equivalentes), como se vê na figura 6.16. A área em verde é uma medida do afastamento entre duas curvas e corresponde a um erro que pode ser avaliado. Para medir este erro, foram comparados os valores altimétricos (em quarenta amostras para quatorze curvas analisadas) da borda externa com os valores altimétricos de uma TIN, figura 6.17, (produzida pelas curvas de nível de referência, de equidistância de 1 m). Este procedimento foi realizado empregando ferramentas de um programa SIG.

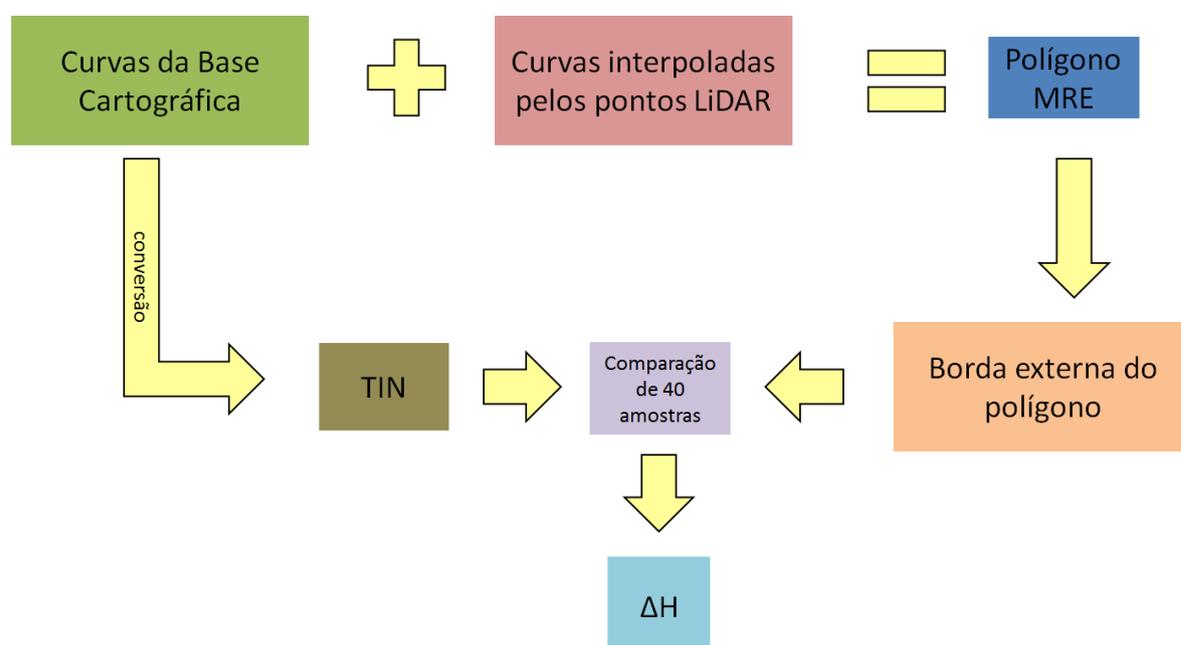


Figura 6.15 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico médio por meio do Método dos Retângulos Equivalentes. Fonte: Elaborado pela autora.

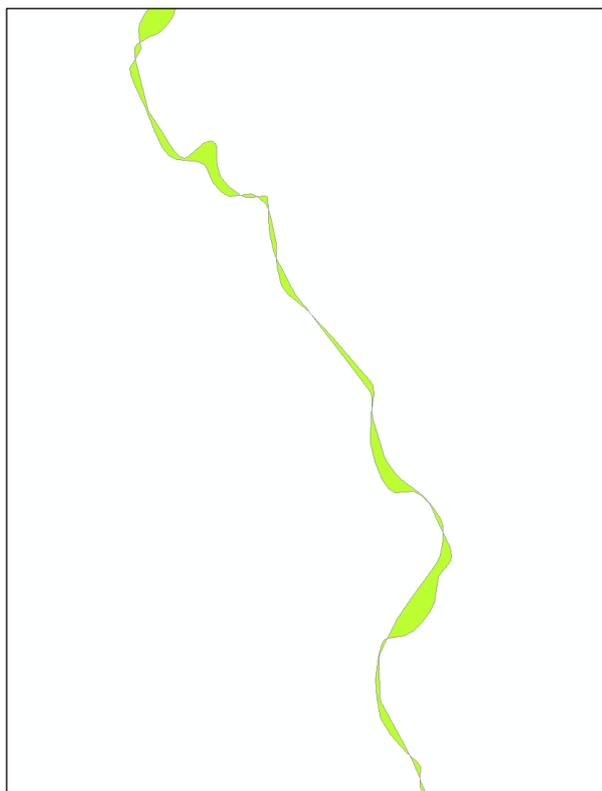


Figura 6.16 - Polígonos originados pela sobreposição de duas curvas de mesmo valor altimétrico.  
Fonte: Elaborado pela autora.

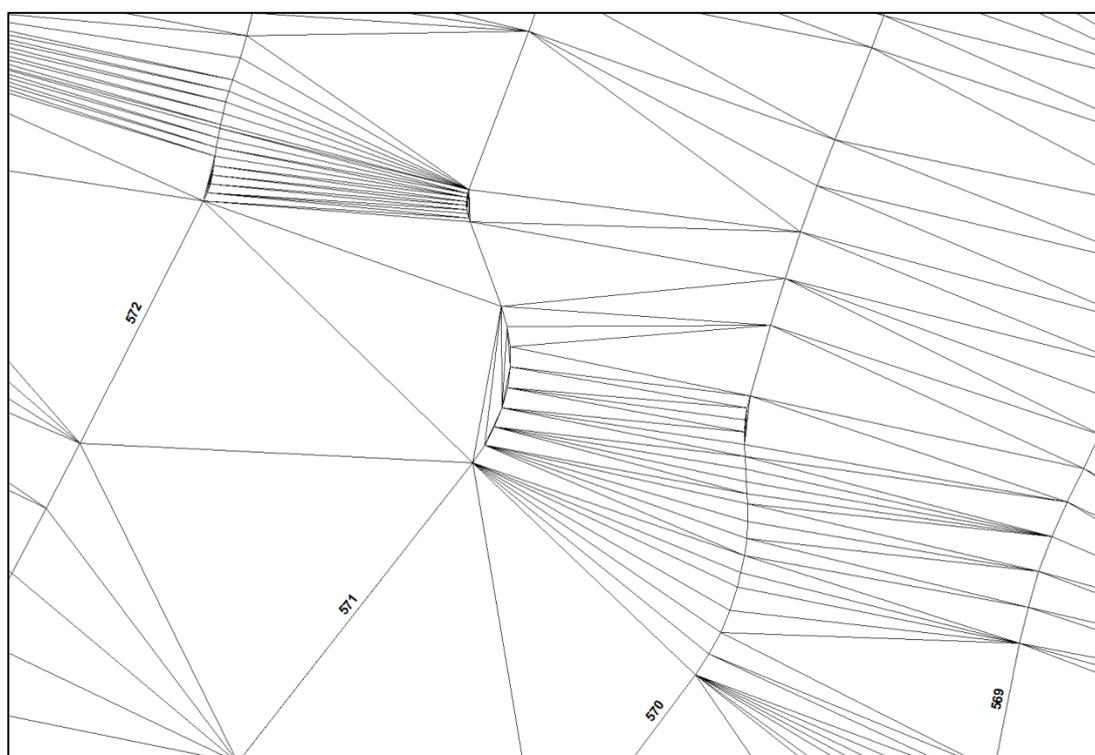


Figura 6.17 - Trecho de uma TIN gerada a partir das curvas de nível da base cartográfica de Campinas (os triângulos da TIN foram definidos pelos vértices das linhas originais das curvas de nível geradas pelo programa ArcGIS 10.1). Fonte: Elaborado pela autora.

O tempo de edição vetorial para unir as curvas de nível das duas fontes citadas para gerar polígonos é mostrado na tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Tempo de edição vetorial para geração dos polígonos.

<b>Edição dos polígonos</b>	<b>Tempo (h)</b>
Curva 570	00:40
Curva 580	00:45
Curva 590	00:50
Curva 600	01:20
Curva 610	01:00
Curva 620	01:00
Curva 630	01:00
Curva 640	00:50
Curva 650	00:50
Curva 660	00:25
Curva 670	00:25
Curva 680	00:20
Curva 690	00:20
Curva 700	00:10
<b>Total</b>	<b>09:55</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

O valor da área total de cada polígono, ou seja, a área do polígono formado pela curva de nível proveniente da base cartográfica (o produto de referência) e pela curva de nível gerada pelos pontos LiDAR, foi dividido pelo comprimento médio da curva de referência. Isso, conforme a teoria apresentada, proporciona o afastamento posicional (plano) médio entre as curvas (da base cartográfica e das derivadas do LiDAR). Os resultados estão na tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Valores de área dos polígonos originados das curvas de nível, do comprimento médio das curvas e do afastamento posicional médio entre elas.

<b>Polígono originado da curva</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Afastamento estimado (m)</b>
570	9.772,286	6.577,835	1,486
580	38.776,992	21.001,179	1,846
590	33.945,576	28.570,197	1,188
600	43.118,386	36.006,473	1,198
610	43.026,378	37.001,338	1,163

<b>Polígono originado da curva</b>	<b>Área (m²)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Afastamento estimado (m)</b>
620	34.539,720	56.482,947	0,612
630	31.323,548	26.144,835	1,198
640	47.083,432	24.489,023	1,923
650	30.079,879	19.534,418	1,540
660	20.502,155	15.827,401	1,295
670	11.034,599	9.532,533	1,158
680	9.210,504	6.647,856	1,385
690	6.167,364	4.574,704	1,348
700	2.743,130	625,345	4,387
Média			1,552
Desvio padrão			0,876

Fonte: Elaborado pela autora.

As diferenças altimétricas, correspondentes ao afastamento plano do polígono, foram medidas utilizando ferramenta computacional aliada ao conhecimento de tridimensionalidade proporcionado pelas redes irregulares triangulares – TIN's (a TIN fornece a informação 3D, e o seu uso possibilita medir desníveis). Os polígonos gerados (de cor rosa na figura 6.18) foram sobrepostos à TIN (gerada pelas curvas de nível da base cartográfica e, portanto, é uma referência) a fim de conhecer o valor altimétrico da TIN na fronteira ou borda que corresponde à curva de nível interpolada pelos pontos LiDAR, e determinar também os locais que correspondem ao maior afastamento da curva de referência (de cor preta na figura 6.18).

As duas bordas do polígono (figura 6.18) representam o mesmo valor altimétrico. A borda correspondente à curva gerada pelos pontos LiDAR, quando comparada a um produto de referência (que é a TIN), pode, então, mostrar o erro altimétrico ( $\Delta H_{TIN}$ ). A obtenção do valor altimétrico é realizada num programa SIG, como o que foi utilizado, o ArcGIS 10.1.

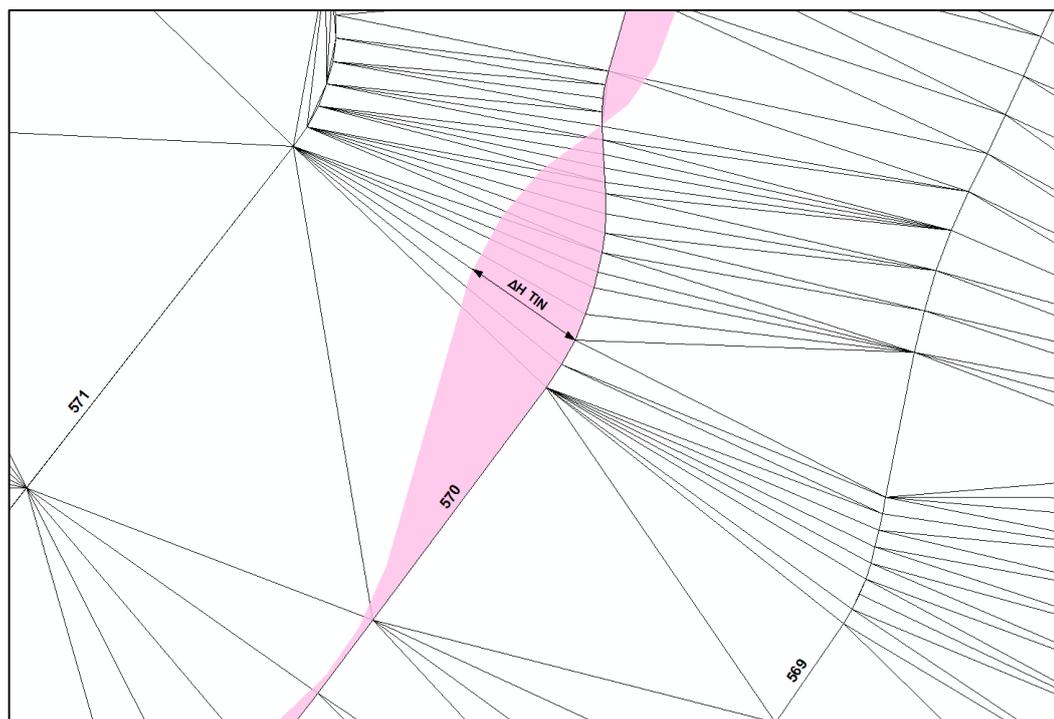


Figura 6.18 - Polígonos referentes a uma curva sobrepostos à TIN. Fonte: Elaborado pela autora.

O procedimento seguinte, melhorando o MRE, foi o de estabelecer um critério para valores positivos e negativos dos erros altimétricos. Definiu-se que (a), figura 6.19, é um valor de amostra negativo porque está na direção dos valores altimétricos decrescentes, e (b) é um valor de amostra positivo porque está na direção dos valores altimétricos crescentes, em relação ao produto base.

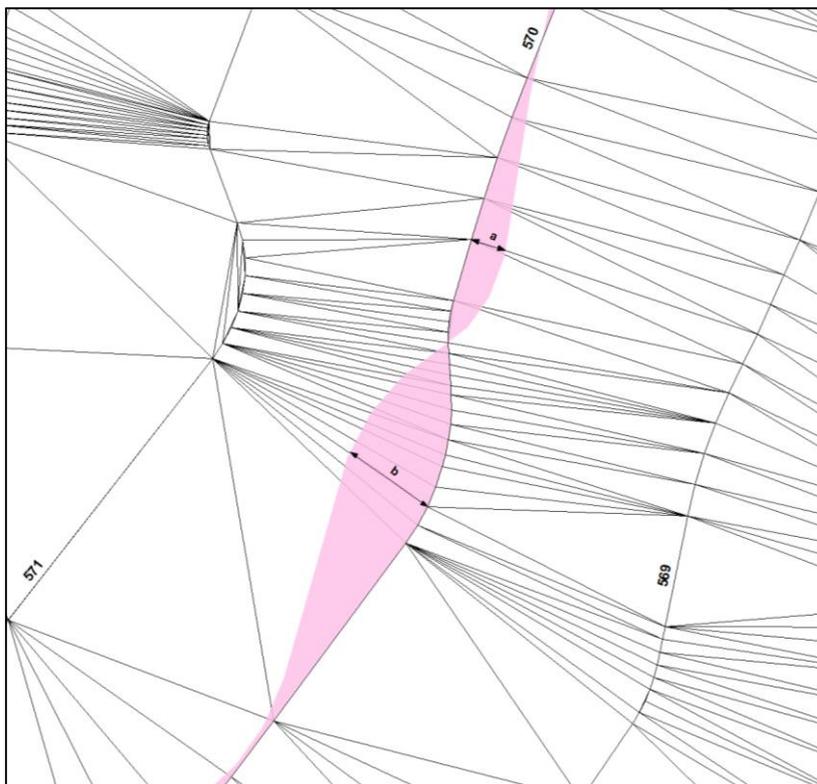


Figura 6.19 - Ilustração para o critério dos valores positivos e negativos dos erros. Fonte: Elaborado pela autora.

Aplicando esses conceitos e coletando 40 amostras (as bordas mais discrepantes) para cada curva de nível, chegou-se aos dados de  $\Delta H_{\text{TIN}}$ , média e desvio padrão para cada curva, apresentados em tabelas no Apêndice E. A curva de nível de cota 700 m era menor e por isso só foi possível coletar 20 amostras.

A tabela 6.15 mostra um resumo das estatísticas das diferenças altimétricas ( $\Delta H_{\text{TIN}}$ ) coletadas para cada curva e um teste de tendência ( $Z_H$ ) para verificar a existência de erros sistemáticos nas amostras.

O valor de  $Z_H$  foi calculado e comparado ao valor teórico de  $Z_{0,95}$  que corresponde a 1,645. O teste de tendência analisa as seguintes condições:

- Se  $|Z_H| > Z_{0,95}$ , existe erro sistemático na componente altimétrica das amostras.
- Se  $|Z_H| < Z_{0,95}$ , não existe erro sistemático na componente altimétrica das amostras.

Tabela 6.15 - Estatísticas das diferenças altimétricas para cada curva de nível.

Curvas de nível	Número de amostras	Média – $\Delta H_{TIN}$ (m)	Desvio padrão – $\Delta H_{TIN}$ (m)	$Z_H$ – Teste de tendência
570	40	-0,010	0,273	-0,232
580	40	0,150	0,558	1,700
590	40	0,028	0,372	0,476
600	40	0,062	0,330	1,188
610	40	0,020	0,153	0,827
620	40	0,033	0,160	1,304
630	40	0,096	0,357	1,701
640	40	0,054	0,253	1,350
650	40	-0,012	0,096	-0,791
660	40	0,024	0,132	1,150
670	40	0,027	0,181	0,943
680	40	-0,023	0,267	-0,545
690	40	0,195	0,564	2,187
700	20	0,041	0,880	0,208

Fonte: Elaborado pela autora.

A média, ou erro sistemático, para cada curva de nível corresponde a um deslocamento altimétrico convencionalizado como positivo ou negativo, como explicado anteriormente e ilustrado na figura 6.19. O valor da média é a principal medida porque corresponde ao erro que um usuário cometeria se avaliasse a altimetria de um ponto interpolado nas curvas de nível.

A ocorrência maior de valores positivos nas médias indica que os maiores afastamentos aconteceram na direção dos valores altimétricos crescentes, como exemplificado na figura 6.19.

Os valores do desvio padrão (que representam a dispersão da população dos dados) são altos, comparados com a média altimétrica, porque as amostras corresponderam aos valores mais discrepantes, ora positivos, ora negativos.

As curvas de nível que apresentaram tendência no teste  $Z_H$  foram:

- A curva 580 com erro altimétrico (média) de 15 cm e desvio padrão de 56 cm;
- A curva 630 com erro altimétrico de 10 cm e desvio padrão de 35 cm; e
- A curva 690 com erro altimétrico de 19 cm e desvio padrão de 56 cm.

## 6.6 Quarto método: avaliação dos erros altimétricos dos pontos LiDAR situados entre curvas de nível consecutivas – proposta e aplicação

A segunda proposta deste trabalho é um método de controle de qualidade da altimetria que pode ser realizado transformando duas curvas de nível consecutivas (de um produto de referência) num polígono e testar os valores altimétricos dos pontos LiDAR, compreendidos dentro desse polígono, como mostra a figura 6.20. Esta seção descreve o experimento.

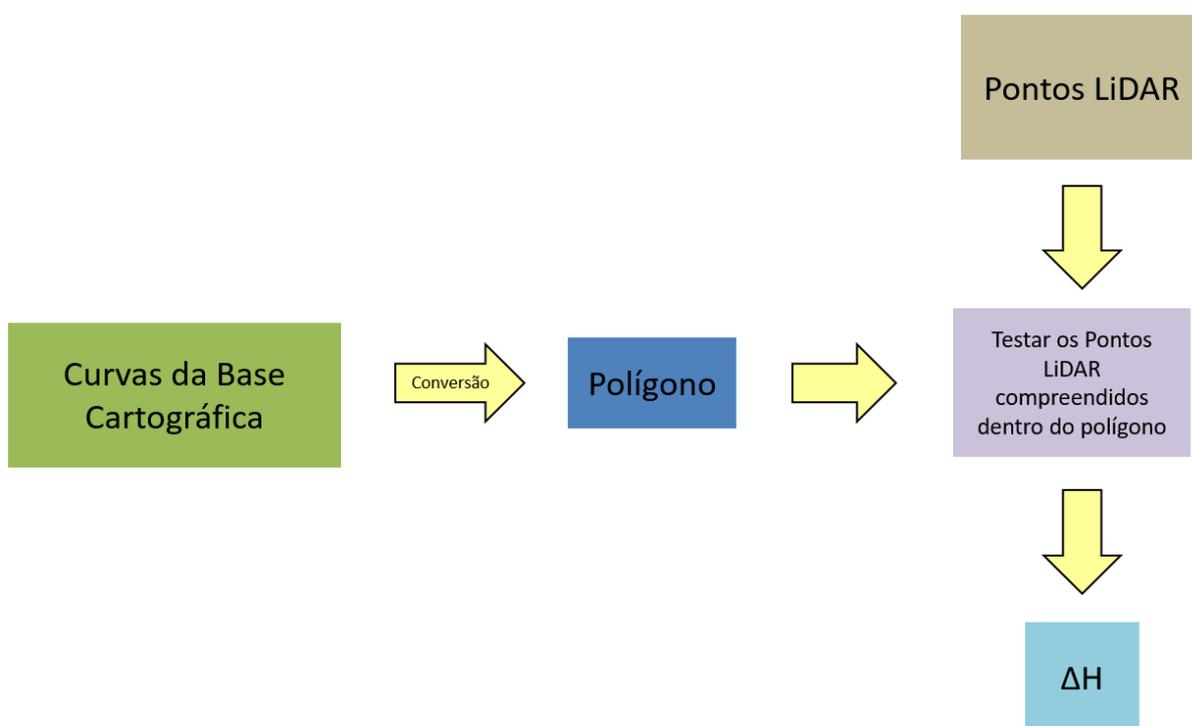


Figura 6.20 - Fluxograma da obtenção do erro altimétrico.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Levando-se em conta que os dados LiDAR constituem sempre uma grande massa de dados (mais de nove milhões e noventa e nove mil pontos no presente caso), ficaria difícil, senão impossível, aplicar o método de controle tradicional, ponto a ponto, até pela pouca significância da amostra. Então, desenvolveu-se uma metodologia própria para o presente trabalho aplicável a qualquer conjunto de dados, que leve em conta o maior número possível de pontos.

O controle altimétrico pode ser e foi realizado da seguinte forma: no ArcGIS 10.1, o intervalo entre duas curvas de nível consecutivas (provenientes da base cartográfica de Campinas) foi convertido para polígono, figura 6.21, criando uma

ligação entre as curvas. Em cada um desses polígonos, foram selecionados todos os pontos LiDAR, classificados como “solo”, compreendidos dentro dele, a fim de realizar uma análise estatística e encontrar aqueles com maiores discrepâncias.

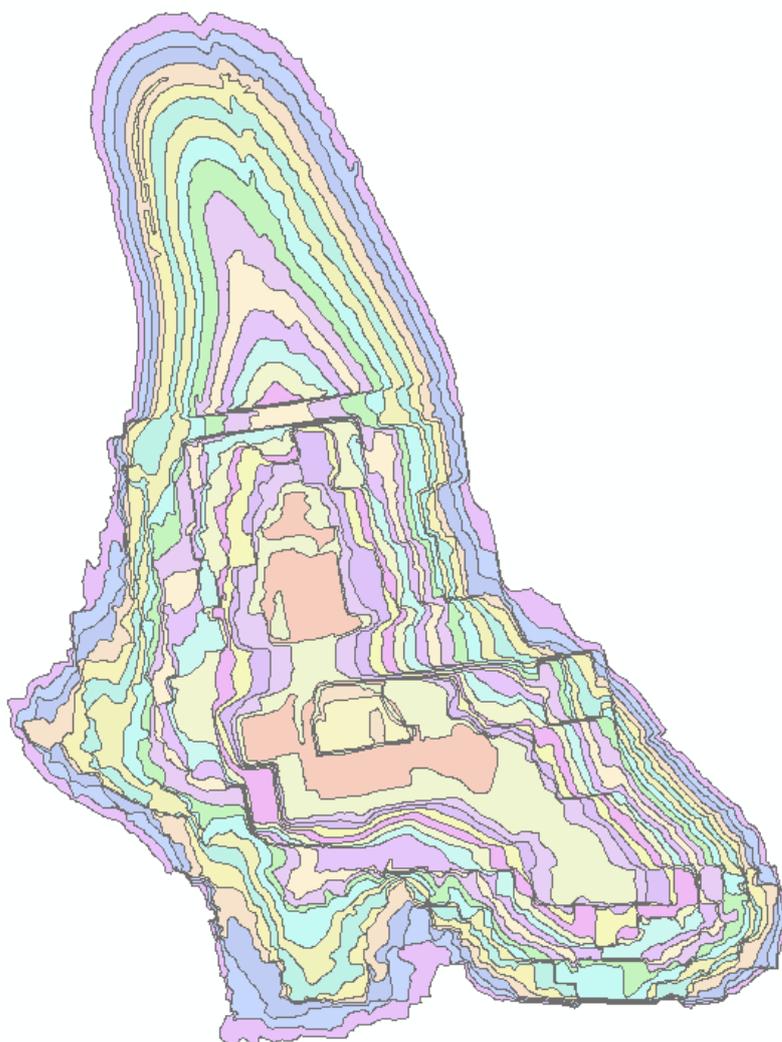


Figura 6.21 - Polígonos criados a partir de curvas de nível consecutivas. Fonte: Elaborado pela autora.

As curvas de nível, do mapeamento de referência (de metro em metro), que abrangem toda a área de trabalho estão compreendidas entre os valores de 566 m e 702 m. Para o presente teste, escolheram-se as curvas de nível de valor 680 m até 702 m.

Os vinte e três polígonos ficaram assim definidos: Polígono 680 – 681; Polígono 681 – 682; Polígono 682 – 683; Polígono 683 – 684; Polígono 684 – 685; Polígono

685 – 686; Polígono 686 – 687; Polígono 687 – 688; Polígono 688 – 689; Polígono 689 – 690; Polígono 690 – 691; Polígono 691 – 692; Polígono 692 – 693; Polígono 693 – 694; Polígono 694 – 695; Polígono 695 – 696; Polígono 696 – 697; Polígono 697 – 698; Polígono 698 – 699; Polígono 699 – 700; Polígono 700 – 701; Polígono 701 – 702; Polígono 702 – 703.

Em cada um dos vinte e três polígonos, foram selecionados todos os pontos, classificados como “solo” pelo LiDAR, para que fosse calculada a diferença ( $\Delta H$ ) entre o valor altimétrico de cada ponto LiDAR e o valor da altitude média do polígono a que o ponto pertence, ou seja, a média das altitudes das duas curvas de nível. Espera-se que os pontos tenham cota menor que a curva superior e maior que a inferior, ou seja, que a diferença  $\Delta H$  em módulo seja menor que 0,5 m. O que excede esse valor (discrepância em  $\Delta H$ ) será analisado estatisticamente.

Com os valores de  $\Delta H$ , procedeu-se à realização de uma estatística descritiva para cada polígono, realizada no programa Excel. Nessa análise, os valores de  $\Delta H$  que ultrapassavam o valor da média mais ou menos três vezes o desvio padrão foram descartados por serem considerados erros grosseiros, desde que superiores em módulo a 0,5 m. A tabela 6.16 mostra o número total dos valores de  $\Delta H$  (total de pontos), o número de erros grosseiros (pontos descartados) e a porcentagem dos erros grosseiros em cada polígono.

Tabela 6.16 - Erros grosseiros em cada polígono analisado.

	<b>Total de pontos</b>	<b>Erros grosseiros</b>	<b>% Erros grosseiros</b>
Polígono 680 - 681	26.676	203	0,76%
Polígono 681 - 682	25.189	124	0,49%
Polígono 682 - 683	24.943	127	0,51%
Polígono 683 - 684	24.944	167	0,67%
Polígono 684 - 685	19.428	123	0,63%
Polígono 685 - 686	20.324	108	0,53%
Polígono 686 - 687	21.049	91	0,43%
Polígono 687 - 688	19.871	79	0,40%
Polígono 688 - 689	20.664	30	0,15%
Polígono 689 - 690	22.234	34	0,15%
Polígono 690 - 691	18.982	23	0,12%
Polígono 691 - 692	14.494	33	0,23%
Polígono 692 - 693	13.648	79	0,58%
Polígono 693 - 694	11.582	167	1,44%

	<b>Total de pontos</b>	<b>Erros grosseiros</b>	<b>% Erros grosseiros</b>
Polígono 694 - 695	9.805	160	1,63%
Polígono 695 - 696	7.901	73	0,92%
Polígono 696 - 697	7.418	66	0,89%
Polígono 697 - 698	7.604	34	0,45%
Polígono 698 - 699	11.483	45	0,39%
Polígono 699 - 700	8.338	73	0,88%
Polígono 700 - 701	473	5	1,06%
Polígono 701 - 702	310	0	0,00%
Polígono 702 - 703	832	20	2,40%

Fonte: Elaborado pela autora.

Como se pode ver, a porcentagem de erros grosseiros é relativamente pequena.

Depois de descartar esses valores de  $\Delta H$ , procedeu-se a uma nova estatística descritiva para todos os polígonos, apresentada juntamente com os respectivos histogramas nas figuras 6.22 a 6.44.

A curtose de uma distribuição mostra se houve concentração de frequências no conjunto de dados. A curtose positiva indica uma distribuição de pico com valor maior que na curva normal (curva leptocúrtica), enquanto a curtose negativa indica uma distribuição achatada perto da média (curva medo ou platicúrtica), com valor menor que na curva normal (ASPRS, 2014).

A assimetria de uma distribuição revela se o conjunto de dados tem tendência à direita ou à esquerda da média. Se a tendência da curva for à esquerda (e, conseqüentemente, as maiores frequências dos dados estiverem à direita da média), então a assimetria será negativa. Analogamente, se a tendência da curva for à direita, então a assimetria será positiva. Dados simétricos têm valor de assimetria próximo de “zero”, como acontece na curva normal.

Nos polígonos (680-681), (685-686), (688-689), (689-690), (694-695), (695-696), (698-699) e (699-700), o valor negativo da curtose indica que os dados ocorreram de forma mais distribuída, ao invés de concentrados em torno de um determinado valor. Já o valor negativo da assimetria, mas não tão distante de zero, indica que os dados se concentraram um pouco mais à direita da média.

Polígono 680 - 681	
Média (m)	-0,005
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	0,000
Moda (m)	-0,130
Desvio padrão (m)	0,316
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,100
Curtose (m)	-0,346
Assimetria (m)	-0,186
Intervalo (m)	2,203
Mínimo (m)	-1,261
Máximo (m)	0,942
Soma (m)	-132,374
Número de amostras	26473

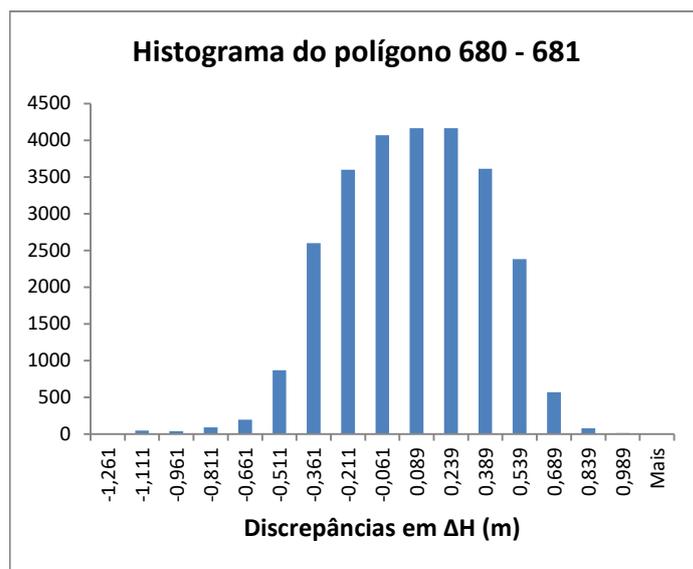


Figura 6.22 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 680-681. Fonte: Elaborado pela autora.

Nos polígonos (681-682), (682-683), (683-684), (684-685), (686-687), (687-688), (690-691), (691-692), (692-693), (693-694), (696-697) e (697-698), o valor negativo da curtose também indica que os dados ocorreram de forma bem mais distribuída. O valor positivo da assimetria, indica que os dados se concentraram um pouco mais à esquerda da média.

Polígono 681 - 682	
Média (m)	-0,019
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,034
Moda (m)	-0,031
Desvio padrão (m)	0,323
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,104
Curtose (m)	-0,741
Assimetria (m)	0,053
Intervalo (m)	2,124
Mínimo (m)	-1,081
Máximo (m)	1,043
Soma (m)	-469,329
Número de amostras	25065

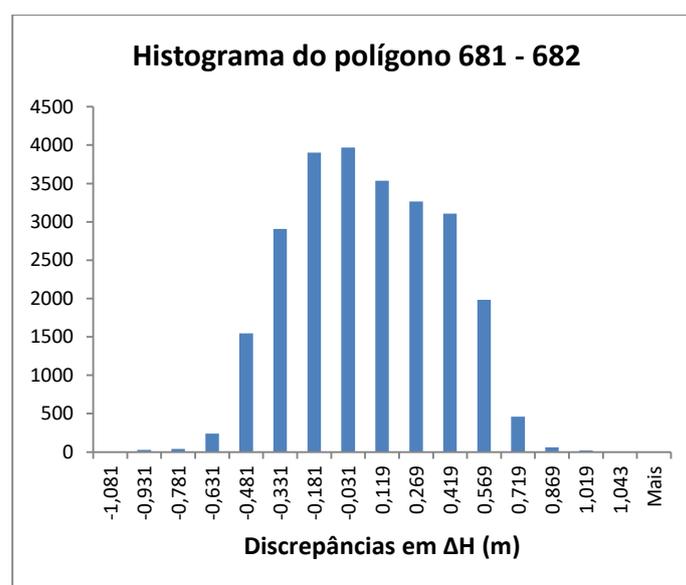


Figura 6.23 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 681-682. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 682-683	
Média (m)	-0,036
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,051
Moda (m)	-0,152
Desvio padrão (m)	0,313
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,098
Curtose (m)	-0,755
Assimetria (m)	0,081
Intervalo (m)	2,013
Mínimo (m)	-1,041
Máximo (m)	0,972
Soma (m)	-889,763
Número de amostras	24816

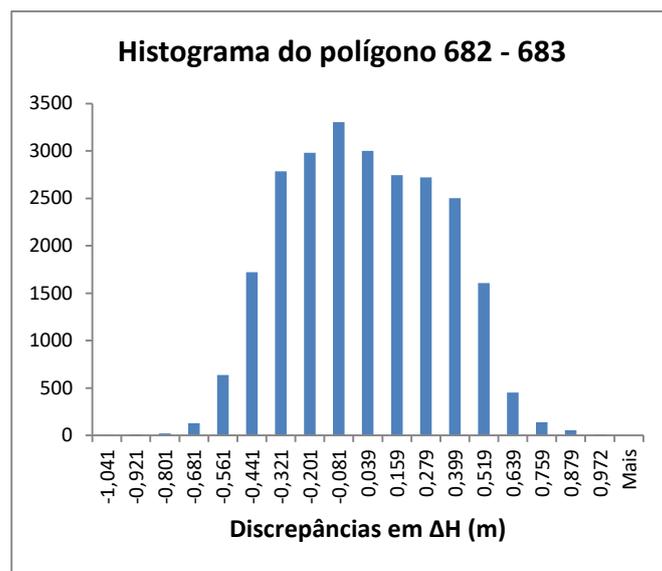


Figura 6.24 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 682-683. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 683-684	
Média (m)	-0,012
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,009
Moda (m)	0,207
Desvio padrão (m)	0,328
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,108
Curtose (m)	-0,793
Assimetria (m)	0,036
Intervalo (m)	2,161
Mínimo (m)	-1,096
Máximo (m)	1,065
Soma (m)	-296,874
Número de amostras	24777

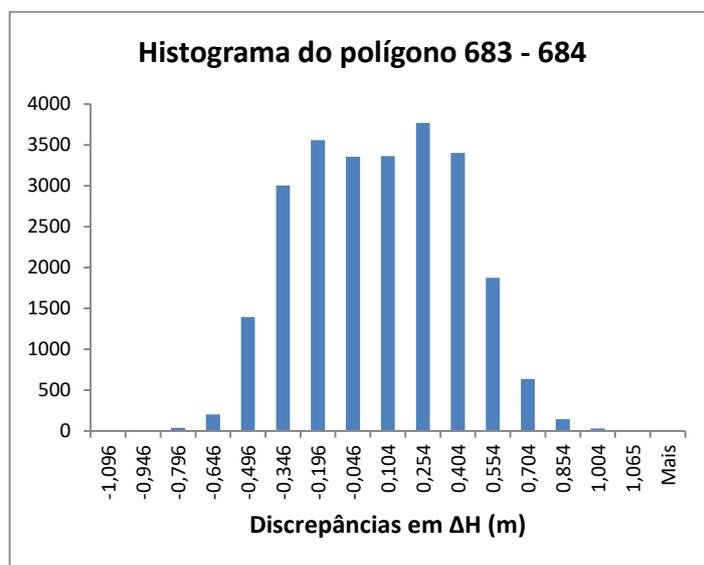


Figura 6.25 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 683-684. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 684-685	
Média (m)	-0,047
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,057
Moda (m)	0,177
Desvio padrão (m)	0,336
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,113
Curtose (m)	-0,711
Assimetria (m)	0,029
Intervalo (m)	2,371
Mínimo (m)	-1,217
Máximo (m)	1,154
Soma (m)	-903,524
Número de amostras	19305

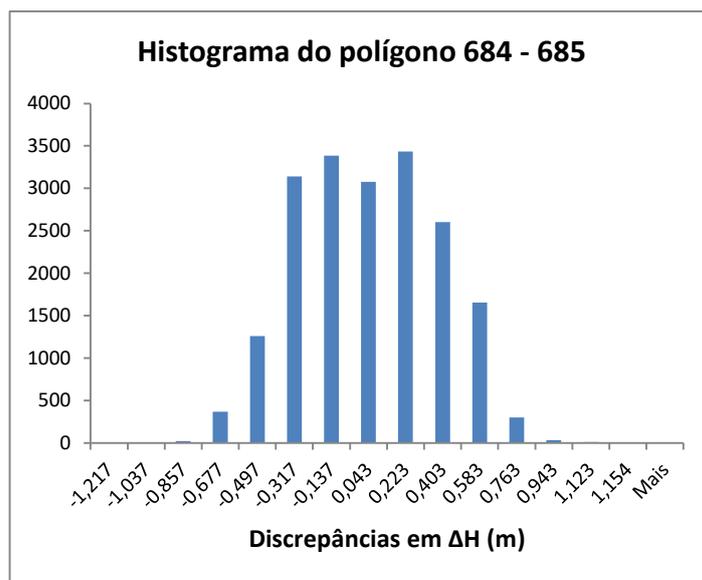


Figura 6.26 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 684-685. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 685-686	
Média (m)	0,001
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	0,008
Moda (m)	-0,066
Desvio padrão (m)	0,303
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,092
Curtose (m)	-0,750
Assimetria (m)	-0,039
Intervalo (m)	2,047
Mínimo (m)	-0,999
Máximo (m)	1,048
Soma (m)	24,111
Número de amostras	20216

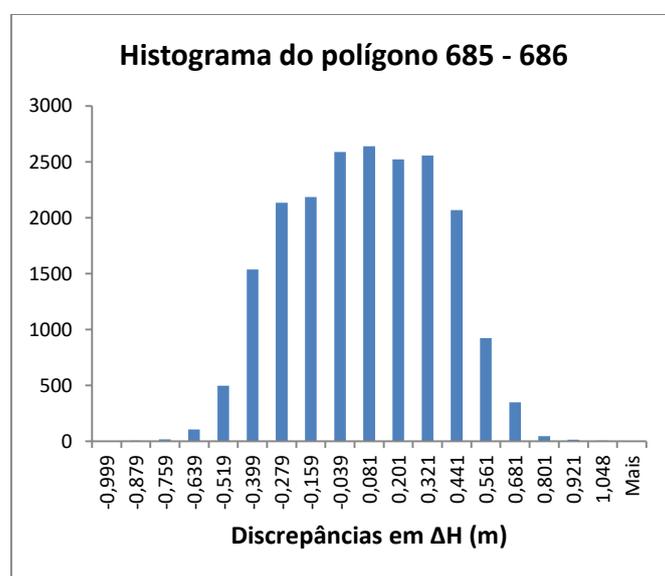


Figura 6.27 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 685-686. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 686-687	
Média (m)	-0,035
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,040
Moda (m)	0,173
Desvio padrão (m)	0,329
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,108
Curtose (m)	-0,748
Assimetria (m)	0,049
Intervalo (m)	2,058
Mínimo (m)	-1,076
Máximo (m)	0,982
Soma (m)	-730,253
Número de amostras	20958

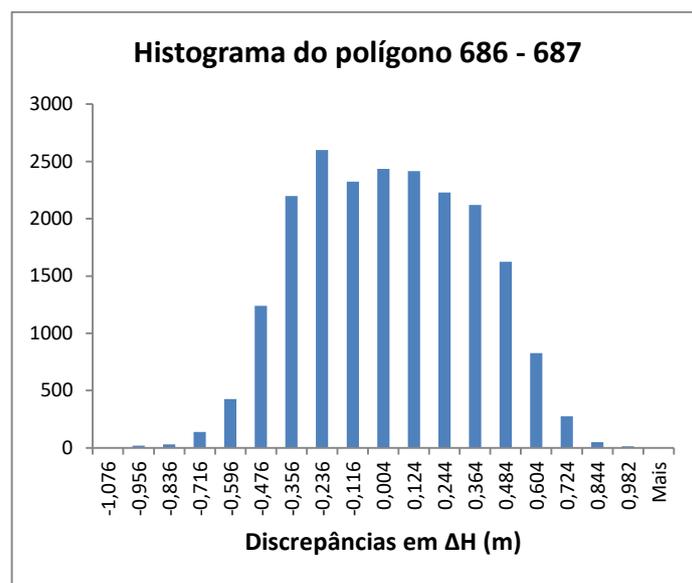


Figura 6.28 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 686-687. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 687-688	
Média (m)	-0,038
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,056
Moda (m)	-0,218
Desvio padrão (m)	0,309
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,095
Curtose (m)	-0,664
Assimetria (m)	0,064
Intervalo (m)	1,904
Mínimo (m)	-0,990
Máximo (m)	0,914
Soma (m)	-748,936
Número de amostras	19792

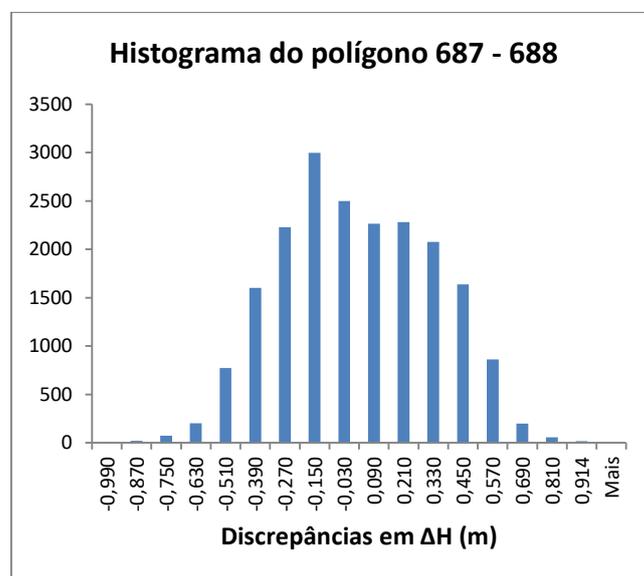


Figura 6.29 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 687-688. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 688-689	
Média (m)	0,010
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	0,028
Moda (m)	-0,019
Desvio padrão (m)	0,337
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,114
Curtose (m)	-0,819
Assimetria (m)	-0,124
Intervalo (m)	2,032
Mínimo (m)	-1,008
Máximo (m)	1,024
Soma (m)	199,825
Número de amostras	20634

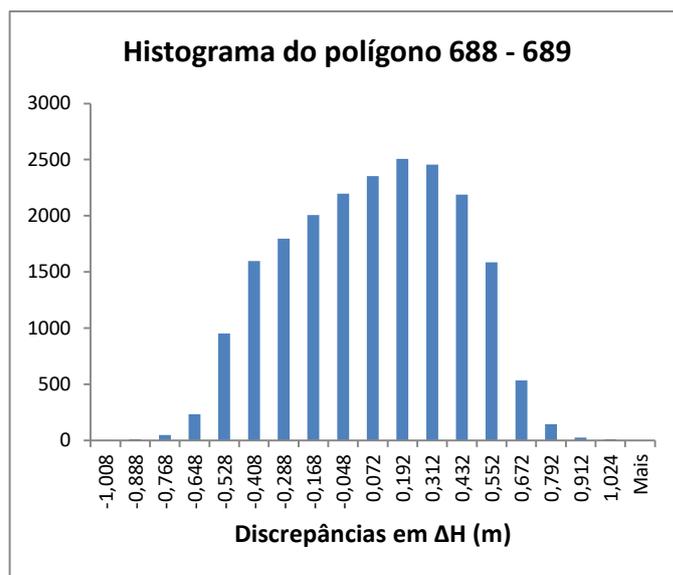


Figura 6.30 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 688-689. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 689-690	
Média (m)	0,020
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	0,025
Moda (m)	-0,141
Desvio padrão (m)	0,322
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,103
Curtose (m)	-0,853
Assimetria (m)	-0,081
Intervalo (m)	1,902
Mínimo (m)	-0,941
Máximo (m)	0,961
Soma (m)	436,103
Número de amostras	22200

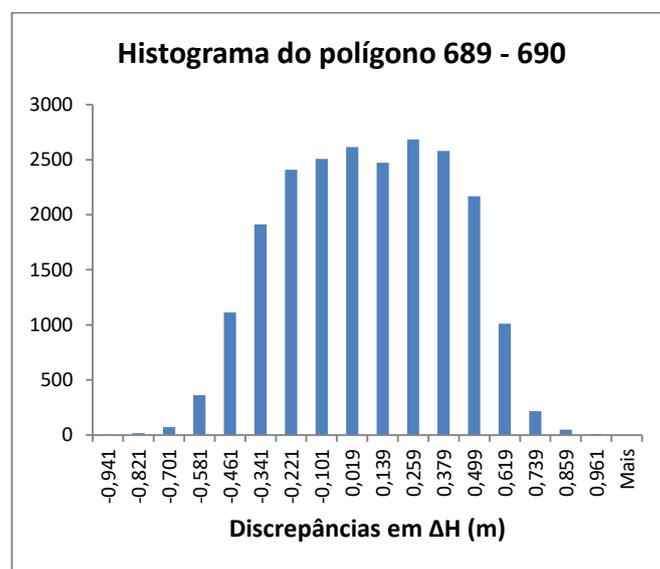


Figura 6.31 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 689-690. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 690-691	
Média (m)	-0,081
Erro padrão (m)	0,002
Mediana (m)	-0,123
Moda (m)	-0,136
Desvio padrão (m)	0,329
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,108
Curtose (m)	-0,782
Assimetria (m)	0,268
Intervalo (m)	1,928
Mínimo (m)	-1,019
Máximo (m)	0,909
Soma (m)	-1532,536
Número de amostras	18959

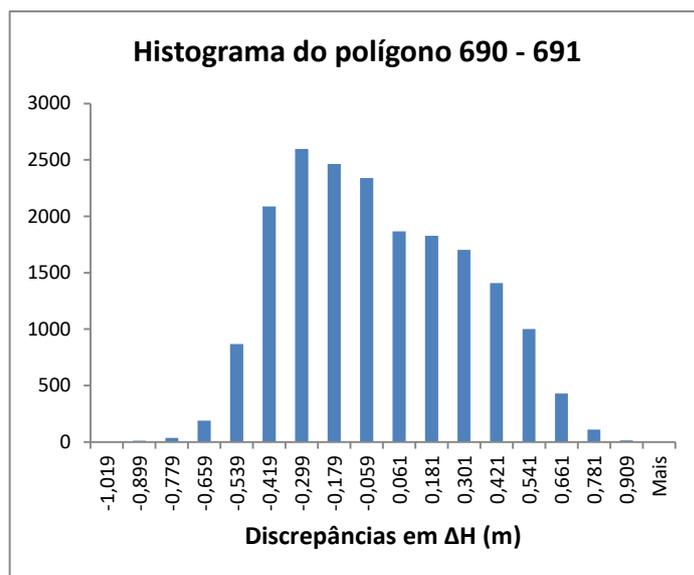


Figura 6.32 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 690-691. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 691-692	
Média (m)	-0,037
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	-0,056
Moda (m)	-0,378
Desvio padrão (m)	0,314
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,099
Curtose (m)	-0,771
Assimetria (m)	0,141
Intervalo (m)	1,896
Mínimo (m)	-0,983
Máximo (m)	0,913
Soma (m)	-540,351
Número de amostras	14461

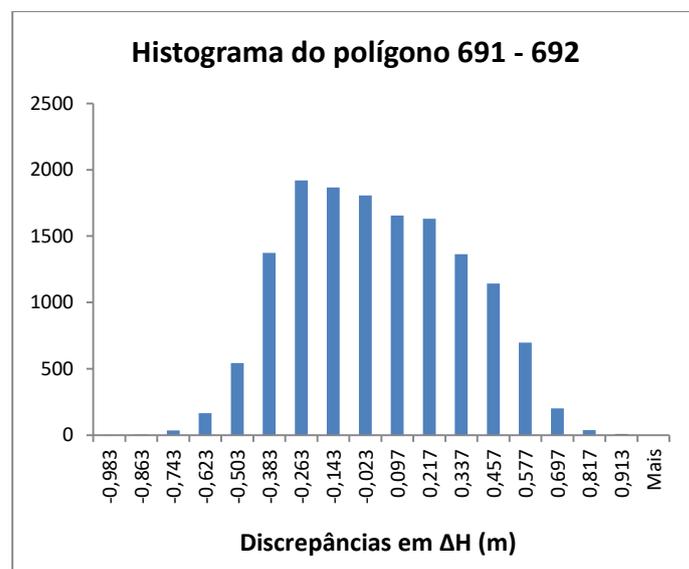


Figura 6.33 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 691-692. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 692-693	
Média (m)	-0,028
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	-0,030
Moda (m)	-0,300
Desvio padrão (m)	0,328
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,108
Curtose (m)	-0,628
Assimetria (m)	0,111
Intervalo (m)	2,063
Mínimo (m)	-1,041
Máximo (m)	1,022
Soma (m)	-381,750
Número de amostras	13569

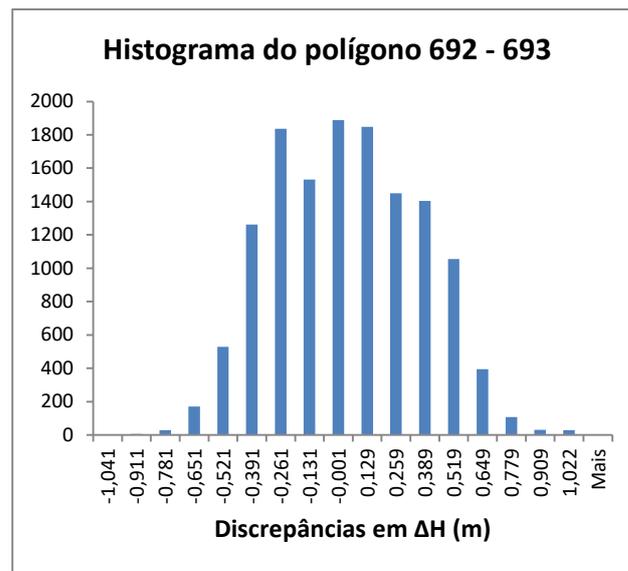


Figura 6.34 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 692-693. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 693-694	
Média (m)	-0,002
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	0,004
Moda (m)	-0,181
Desvio padrão (m)	0,331
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,110
Curtose (m)	-0,398
Assimetria (m)	0,107
Intervalo (m)	2,314
Mínimo (m)	-1,126
Máximo (m)	1,188
Soma (m)	-19,606
Número de amostras	11415

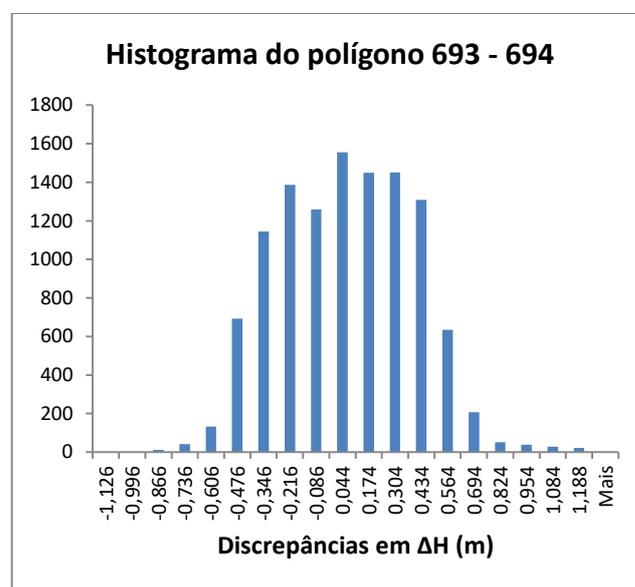


Figura 6.35 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 693-694. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 694-695	
Média (m)	-0,077
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	-0,090
Moda (m)	-0,356
Desvio padrão (m)	0,329
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,108
Curtose (m)	-0,262
Assimetria (m)	-0,086
Intervalo (m)	2,312
Mínimo (m)	-1,229
Máximo (m)	1,083
Soma (m)	-745,619
Número de amostras	9645

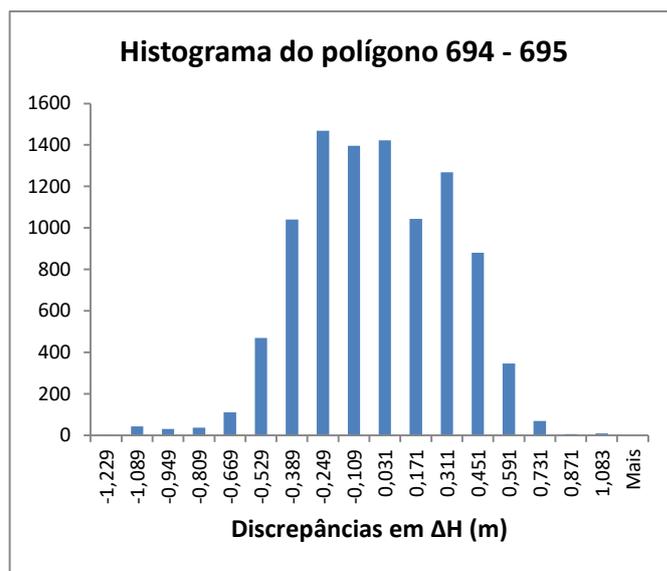


Figura 6.36 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 694-695. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 695-696	
Média (m)	0,032
Erro padrão (m)	0,004
Mediana (m)	0,070
Moda (m)	0,157
Desvio padrão (m)	0,341
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,116
Curtose (m)	-0,537
Assimetria (m)	-0,171
Intervalo (m)	2,158
Mínimo (m)	-1,037
Máximo (m)	1,121
Soma (m)	249,010
Número de amostras	7828

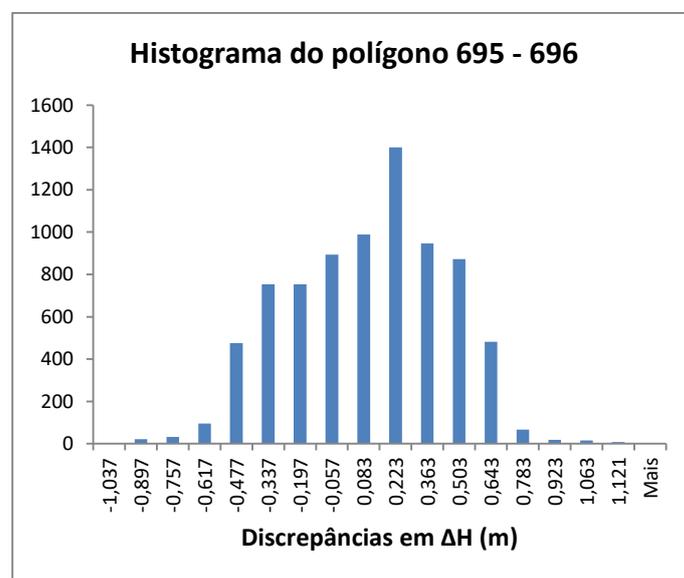


Figura 6.37 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 695-696. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 696-697	
Média (m)	-0,037
Erro padrão (m)	0,004
Mediana (m)	-0,056
Moda (m)	-0,354
Desvio padrão (m)	0,371
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,138
Curtose (m)	-0,476
Assimetria (m)	0,221
Intervalo (m)	2,348
Mínimo (m)	-1,201
Máximo (m)	1,147
Soma (m)	-273,928
Número de amostras	7352

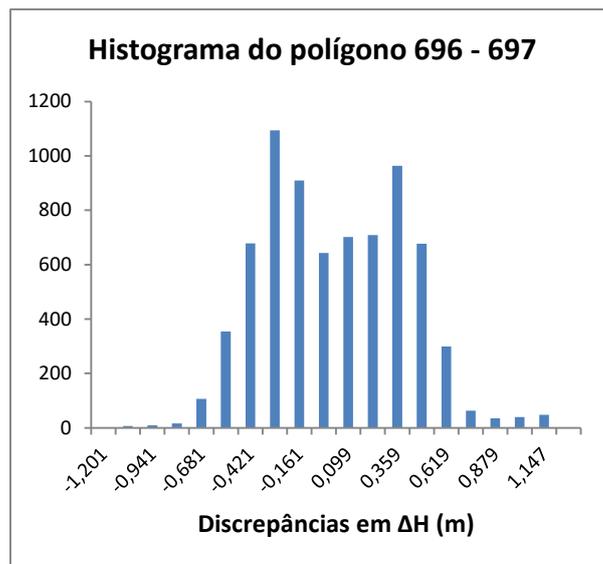


Figura 6.38 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 696-697. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 697-698	
Média (m)	-0,063
Erro padrão (m)	0,004
Mediana (m)	-0,084
Moda (m)	-0,356
Desvio padrão (m)	0,325
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,105
Curtose (m)	-0,896
Assimetria (m)	0,161
Intervalo (m)	1,924
Mínimo (m)	-1,051
Máximo (m)	0,873
Soma (m)	-474,095
Número de amostras	7570

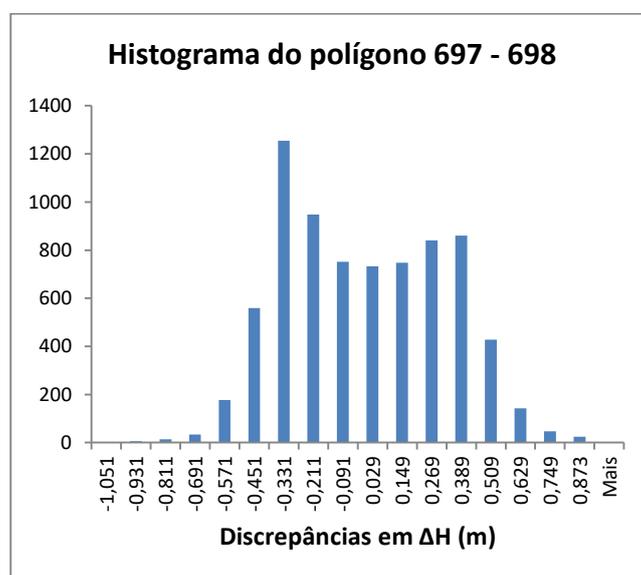


Figura 6.39 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 697-698. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 698-699	
Média (m)	0,047
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	0,027
Moda (m)	-0,095
Desvio padrão (m)	0,320
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,102
Curtose (m)	-0,716
Assimetria (m)	-0,085
Intervalo (m)	1,838
Mínimo (m)	-0,949
Máximo (m)	0,889
Soma (m)	532,737
Número de amostras	11438

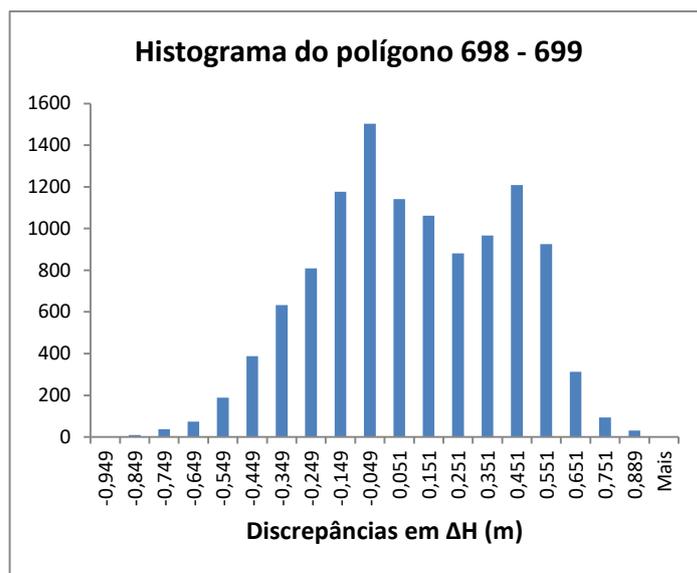


Figura 6.40 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 698-699. Fonte: Elaborado pela autora.

Polígono 699-700	
Média (m)	-0,103
Erro padrão (m)	0,003
Mediana (m)	-0,078
Moda (m)	-0,048
Desvio padrão (m)	0,238
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,057
Curtose (m)	0,494
Assimetria (m)	-0,153
Intervalo (m)	1,546
Mínimo (m)	-0,876
Máximo (m)	0,670
Soma (m)	-851,904
Número de amostras	8265

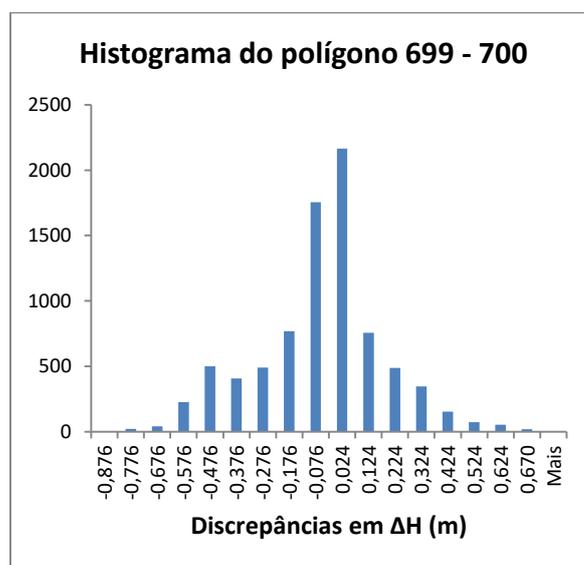


Figura 6.41 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 699-700. Fonte: Elaborado pela autora.

No polígono 700-701, o valor positivo da curtose indica que os dados se concentraram próximos ao valor da moda (0,032). O significativo valor da assimetria (-1,060), indica que os dados se concentraram bem mais à direita da média.

Polígono 700-701	
Média (m)	-0,251
Erro padrão (m)	0,015
Mediana (m)	-0,188
Moda (m)	0,032
Desvio padrão (m)	0,324
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,105
Curtose (m)	1,149
Assimetria (m)	-1,060
Intervalo (m)	1,720
Mínimo (m)	-1,262
Máximo (m)	0,458
Soma (m)	-117,415
Número de amostras	468

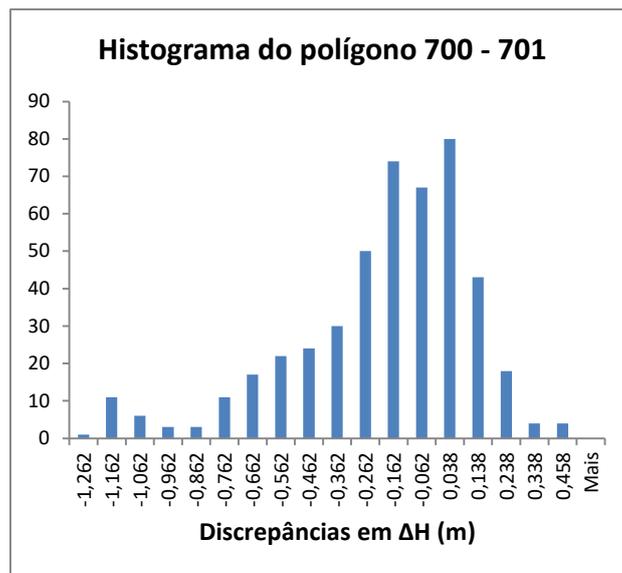


Figura 6.42 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 700-701. Fonte: Elaborado pela autora.

No polígono 701-702, ocorreram duas médias (bimodal) observadas pelos patamares em torno dos valores (-1,296) e (0,144). Neste caso particular, há dois subconjuntos que poderiam ser analisados separadamente, um deles concentra-se à direita da média e outro concentra-se à esquerda da média. Por análise visual sobre as ortofotos, percebe-se que o polígono analisado se encontra no entorno da reitoria da PUC-Campinas, abrangendo parte do local do edifício. De um lado desse edifício houve predominância de pontos LiDAR com valores altimétricos entre 699 m e 701 m. E do outro lado desse edifício houve predominância de pontos com valores entre 701 m e 702 m.

Polígono 701-702	
Média (m)	-0,835
Erro padrão (m)	0,044
Mediana (m)	-1,098
Moda (m)	0,118
Desvio padrão (m)	0,776
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,601
Curtose (m)	-1,552
Assimetria (m)	0,110
Intervalo (m)	2,814
Mínimo (m)	-2,196
Máximo (m)	0,618
Soma (m)	-259,002
Número de amostras	310

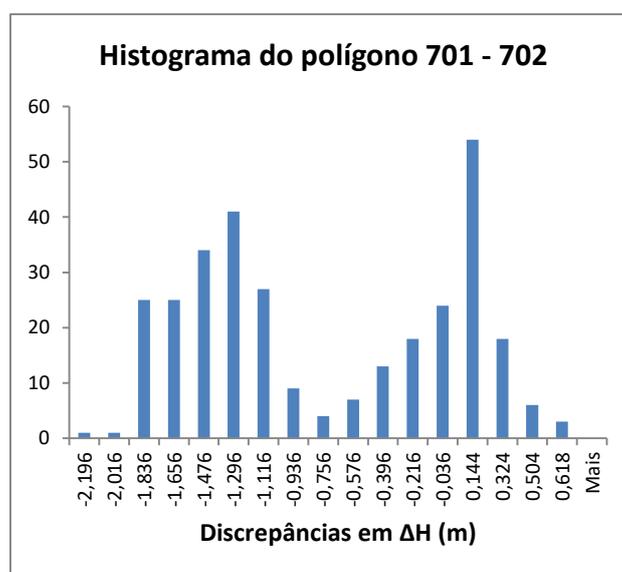


Figura 6.43 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 701-702. Fonte: Elaborado pela autora.

O polígono 702-703 é um caso atípico porque trata-se de uma região de topo, que foi delimitada apenas pela curva de nível de cota 702 m. O valor da curtose confirma a concentração dos dados (no intervalo -0,147 a 0,069) e o valor da assimetria indica que os dados se concentraram bem mais à direita da média.

Polígono 702-703	
Média (m)	-0,516
Erro padrão (m)	0,026
Mediana (m)	-0,181
Moda (m)	-0,163
Desvio padrão (m)	0,750
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,562
Curtose (m)	4,068
Assimetria (m)	-2,215
Intervalo (m)	3,216
Mínimo (m)	-3,147
Máximo (m)	0,069
Soma (m)	-419,099
Número de amostras	812



Figura 6.44 - Estatística descritiva e histograma da componente  $\Delta H$  para o polígono 702-703. Fonte: Elaborado pela autora.

O resumo da análise estatística dos vinte e três conjuntos de dados, com os respectivos valores de média, desvio padrão, curtose e assimetria estão na tabela 6.17.

Tabela 6.17 - Resumo da análise estatística.

Polígono	Média (m)	Desvio padrão (m)	Curtose (m)	Assimetria (m)
680-681	-0,005	0,316	-0,346	-0,186
681-682	-0,019	0,323	-0,741	0,053
682-683	-0,036	0,313	-0,755	0,081
683-684	-0,012	0,328	-0,793	0,036
684-685	-0,047	0,336	-0,711	0,029
685-686	0,001	0,303	-0,750	-0,039
686-687	-0,035	0,329	-0,748	0,049
687-688	-0,038	0,309	-0,664	0,064
688-689	0,010	0,337	-0,819	-0,124
689-690	0,020	0,322	-0,853	-0,081
690-691	-0,081	0,329	-0,782	0,268
691-692	-0,037	0,314	-0,771	0,141
692-693	-0,028	0,328	-0,628	0,111

Polígono	Média (m)	Desvio padrão (m)	Curtose (m)	Assimetria (m)
693-694	-0,002	0,331	-0,398	0,107
694-695	-0,077	0,329	-0,262	-0,086
695-696	0,032	0,341	-0,537	-0,171
696-697	-0,037	0,371	-0,476	0,221
697-698	-0,063	0,325	-0,896	0,161
698-699	0,047	0,320	-0,716	-0,085
699-700	-0,103	0,238	0,494	-0,153
700-701	-0,251	0,324	1,149	-1,060
701-702	-0,835	0,776	-1,552	0,110
702-703	-0,516	0,750	4,068	-2,215
Média Geral	-0,092	0,361	-0,369	-0,120

Fonte: Elaborado pela autora.

A média geral foi de (-0,092 m), ou seja, 9 cm, em módulo. Era de se esperar que a média geral se aproximasse de zero e não poderia haver, em tese, conjuntos de dados / distribuições com diferença maior, em módulo, do que 0,5 m. A média passou de |0,5| m nos dois últimos polígonos (701-702 e 702-703).

O histograma do polígono 701-702 e de alguns outros (696-697; 697-698; 698-699) mostrou a ocorrência de dois conjuntos de dados (bimodais), cada um com sua média e desvio padrão, que podem corresponder a patamares no relevo.

O polígono 702-703 representa uma região de topo e o intervalo, entre a cota mínima e a cota máxima dos pontos LiDAR nessa área, ultrapassa 3 m. Essa diferença reflete-se no valor da média. Ou seja, os dois últimos polígonos discrepam muito dos demais.

Analisando as médias da componente  $\Delta H$  dos vinte e três conjuntos de dados, tabela 6.18, chegou-se ao seguinte resultado: em três polígonos, a média foi menor que 1 cm; em treze polígonos, a média ficou entre 1 e 5 cm; em três polígonos, a média ficou entre 5 e 10 cm; em dois polígonos a média ficou entre 10 e 50 cm; e em 2 polígonos a média foi maior que 50 cm não passando de 83 cm.

Tabela 6.18 - Análise das médias da componente  $\Delta H$ .

Conjuntos de dados	
Média <  0,010 m	3
0,010 m  ≤ Média <  0,050 m	13
0,050 m  ≤ Média <  0,10 m	3
0,10 m  ≤ Média <  0,50 m	2
Média ≥  0,50 m	2

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a assimetria da componente  $\Delta H$  dos vinte e três conjuntos de dados, tabela 6.19, chegou-se ao resultado: vinte e um polígonos tiveram assimetria no intervalo menor ou igual a  $|0,50|$ , o que significa que a maioria dos dados não estava distante da média; dois polígonos tiveram assimetria menor que  $(-0,50)$ , o que significa que houve uma incidência maior dos dados à direita da média; e nenhum apresentou assimetria maior que  $0,50$ .

Tabela 6.19 - Análise das assimetrias da componente  $\Delta H$ .

	Conjuntos de dados
$-0,50 \leq \text{Assimetria} \leq 0,50$	21
$\text{Assimetria} < -0,50$	2
$\text{Assimetria} > 0,50$	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a curtose da componente  $\Delta H$  dos vinte e três conjuntos de dados, tabela 6.20, chegou-se ao seguinte resultado: vinte polígonos tiveram valor de curtose negativo, o que significa curvas platicúrticas; e três polígonos tiveram valor de curtose positiva, o que significa curvas leptocúrticas ou mais acentuadas em torno de valores da média. Em relação à normalidade (quando, em módulo, a curtose é menor que  $0,5$ ), quinze polígonos tiveram valor de curtose abaixo de  $-0,5$ ; seis polígonos tiveram curtose no intervalo  $(-0,5)$  e  $0,5$ ; e dois polígonos tiveram curtose acima de  $0,5$ .

Tabela 6.20 - Análise das curtoses da componente  $\Delta H$ .

	Conjuntos de dados
$\text{Curtose} < 0$	20
$\text{Curtose} > 0$	3
$\text{Curtose} < -0,5$	15
$-0,5 \leq \text{Curtose} \leq 0,5$	6
$\text{Curtose} > 0,5$	2

Fonte: Elaborado pela autora.

Em teoria, as diferenças altimétricas ( $\Delta H$ ) podem apresentar uma distância máxima de  $0,5$  m em relação à curva média, sem que se possa dizer que existe erro. Erros acima desse valor correspondem certamente a erros, maiores ou menores, aceitáveis ou não.

A partir deste conceito é possível realizar outra análise medindo a magnitude do afastamento maior que 0,5 m (para mais ou para menos) e comparar essa magnitude com o PEC-PCD.

Assim, o que se sugere não está contemplado na norma brasileira, sendo os valores numéricos desta um simples parâmetro ou valor de comparação. Por exemplo, um ponto que esteja afastado da média de 0,90 m tem pelo menos 0,40 m de erro (deveria estar no máximo a 0,50); considera-se que há um excesso de 0,40 m, que corresponde certamente a erro e pode ser comparado com a magnitude do PEC-PCD. Pode-se quantificar a quantidade de pontos que excede 0,50 m somado ao valor do PEC-PCD. Se a quantidade for maior que 10%, com certeza seria um produto rejeitado pela norma brasileira, em função do erro constatado.

Os resultados da análise de comparação com o PEC-PCD estão apresentados nas tabelas 6.21 a 6.25.

Tabela 6.21 - Comparação com o PEC-PCD (parte 1/5)

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
		Polígono 680-681		Polígono 681-682		Polígono 682-683		Polígono 683-684		Polígono 684-685	
1/	A	1,74%	A	1,34%	A	1,35%	A	1,70%	A	2,91%	A
	B	0,65%	A	0,30%	A	0,17%	A	0,30%	A	0,36%	A
	C	0,45%	A	0,20%	A	0,08%	A	0,12%	A	0,19%	A
	D	0,28%	A	0,07%	A	0,02%	A	0,04%	A	0,11%	A
1.000	A	1,74%	A	1,34%	A	1,35%	A	1,70%	A	2,91%	A
	B	0,65%	A	0,30%	A	0,17%	A	0,30%	A	0,36%	A
	C	0,45%	A	0,20%	A	0,08%	A	0,12%	A	0,19%	A
	D	0,28%	A	0,07%	A	0,02%	A	0,04%	A	0,11%	A
2.000	A	1,74%	A	1,34%	A	1,35%	A	1,70%	A	2,91%	A
	B	0,65%	A	0,30%	A	0,17%	A	0,30%	A	0,36%	A
	C	0,45%	A	0,20%	A	0,08%	A	0,12%	A	0,19%	A
	D	0,28%	A	0,07%	A	0,02%	A	0,04%	A	0,11%	A
5.000	A	0,62%	A	0,29%	A	0,15%	A	0,27%	A	0,32%	A
	B	0,12%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,03%	A
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
10.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
25.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								

Escola	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
1/		Polígono 680-681		Polígono 681-682		Polígono 682-683		Polígono 683-684		Polígono 684-685	
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								

\* Aprovado (A) / Rejeitado (R)

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6.22 - Comparação com o PEC-PCD (parte 2/5)

Escola	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
1/		Polígono 685-686		Polígono 686-687		Polígono 687-688		Polígono 688-689		Polígono 689-690	
	A	0,83%	A	2,02%	A	1,48%	A	1,95%	A	1,33%	A
	B	0,17%	A	0,33%	A	0,26%	A	0,27%	A	0,12%	A
	C	0,07%	A	0,19%	A	0,09%	A	0,08%	A	0,05%	A
	D	0,01%	A	0,06%	A	0,00%	A	0,02%	A	0,00%	A
2.000	A	0,83%	A	2,02%	A	1,48%	A	1,95%	A	1,33%	A
	B	0,17%	A	0,33%	A	0,26%	A	0,27%	A	0,12%	A
	C	0,07%	A	0,19%	A	0,09%	A	0,08%	A	0,05%	A
	D	0,01%	A	0,06%	A	0,00%	A	0,02%	A	0,00%	A
5.000	A	0,15%	A	0,30%	A	0,24%	A	0,23%	A	0,11%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
10.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
25.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								

\* Aprovado (A) / Rejeitado (R)

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6.23 - Comparação com o PEC-PCD (parte 3/5)

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	
		Resultado*	Resultado*								
1/		Polígono 690-691		Polígono 691-692		Polígono 692-693		Polígono 693-694		Polígono 694-695	
1.000	A	1,70%	A	1,20%	A	2,22%	A	2,31%	A	2,54%	A
	B	0,15%	A	0,12%	A	0,48%	A	0,93%	A	1,17%	A
	C	0,07%	A	0,03%	A	0,29%	A	0,60%	A	0,91%	A
	D	0,01%	A	0,00%	A	0,07%	A	0,38%	A	0,76%	A
2.000	A	1,70%	A	1,20%	A	2,22%	A	2,31%	A	2,54%	A
	B	0,15%	A	0,12%	A	0,48%	A	0,93%	A	1,17%	A
	C	0,07%	A	0,03%	A	0,29%	A	0,60%	A	0,91%	A
	D	0,01%	A	0,00%	A	0,07%	A	0,38%	A	0,76%	A
5.000	A	0,13%	A	0,10%	A	0,43%	A	0,90%	A	1,16%	A
	B	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,05%	A	0,12%	A
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
10.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
25.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								

\* Aprovado (A) / Rejeitado (R)

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6.24 - Comparação com o PEC-PCD (parte 4/5)

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD		% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	
		Resultado*	Resultado*								
1/		Polígono 695-696		Polígono 696-697		Polígono 697-698		Polígono 698-699		Polígono 699-700	
1.000	A	2,31%	A	4,12%	A	1,61%	A	1,69%	A	0,83%	A
	B	0,93%	A	1,69%	A	0,29%	A	0,22%	A	0,05%	A
	C	0,66%	A	1,33%	A	0,13%	A	0,03%	A	0,00%	A
	D	0,26%	A	0,87%	A	0,03%	A	0,00%	A	0,00%	A

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
		Polígono 695-696		Polígono 696-697		Polígono 697-698		Polígono 698-699		Polígono 699-700	
1/	A	2,31%	A	4,12%	A	1,61%	A	1,69%	A	0,83%	A
	B	0,93%	A	1,69%	A	0,29%	A	0,22%	A	0,05%	A
	C	0,66%	A	1,33%	A	0,13%	A	0,03%	A	0,00%	A
	D	0,26%	A	0,87%	A	0,03%	A	0,00%	A	0,00%	A
2.000	A	0,86%	A	1,55%	A	0,29%	A	0,18%	A	0,02%	A
	B	0,00%	A	0,03%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
5.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
10.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								
25.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A								
	C	0,00%	A								
	D	0,00%	A								

\* Aprovado (A) / Rejeitado (R)

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6.25 - Comparação com o PEC-PCD (parte 5/5)

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
		Polígono 700-701		Polígono 701-702		Polígono 702-703	
1/	A	10,90%	R	54,84%	R	20,81%	R
	B	5,98%	A	53,23%	R	19,09%	R
	C	4,49%	A	52,90%	R	18,60%	R
	D	4,27%	A	51,29%	R	17,49%	R
2.000	A	10,90%	R	54,84%	R	20,81%	R
	B	5,98%	A	53,23%	R	19,09%	R
	C	4,49%	A	52,90%	R	18,60%	R
	D	4,27%	A	51,29%	R	17,49%	R

Escala	Classe PEC - PCD	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*	% da comp. ΔH superior ao PEC-PCD	Resultado*
1/							
		<b>Polígono 700-701</b>		<b>Polígono 701-702</b>		<b>Polígono 702-703</b>	
5.000	A	5,77%	A	53,23%	R	19,09%	R
	B	2,56%	A	49,03%	R	16,01%	R
	C	0,00%	A	40,65%	R	14,41%	R
	D	0,00%	A	26,13%	R	11,82%	R
10.000	A	0,00%	A	36,45%	R	14,29%	R
	B	0,00%	A	0,32%	A	5,30%	A
	C	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	D	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
25.000	A	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	B	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	C	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A
	D	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A

\* Aprovado (A) / Rejeitado (R)

Fonte: Elaborado pela autora.

O resultado desta nova análise mostrou que dos vinte e três polígonos analisados:

- a) Vinte polígonos atenderam a classe A e um atendeu a classe B na escala 1:1.000; e
- b) Dois polígonos (701-702 e 702-703) atenderam a classe B na escala 1:10.000.

A grande maioria dos conjuntos de dados testados neste experimento atendeu a melhor classificação do padrão de exatidão cartográfica para escala cadastral, mas para atender ao usuário deve-se informar a classificação mais rigorosa, no caso, classe B na escala 1:1.000 para 21 polígonos. Nos dois conjuntos de dados referentes aos polígonos de cota mais elevada (701-702 m e 702-703 m), os erros altimétricos foram maiores como mostrou a análise da estatística descritiva e os histogramas.

O método, em resumo, apesar de não empregar a cota de cada ponto, analisa afastamentos da média (de uma quantidade muito grande de pontos) e considera intervalos de mais de 0,5 m das curvas de nível.

## 6.7 Método tradicional da norma brasileira – Teste de avaliação da acurácia com pontos de controle levantados em campo

O presente item consiste na aplicação da metodologia tradicional, ponto a ponto, para testar e comparar a teoria e os métodos apresentados nesta tese com o cálculo tradicional: coleta de altimetria em pontos discretos através de técnica mais precisa e comparação com a altimetria obtida no modelo LiDAR.

Para o cálculo da acurácia com pontos de controle levantados em campo, figura 6.45, foram utilizados os pontos de controle altimétrico obtidos por técnica GNSS disponíveis no trabalho de Paula (2017), localizados na mesma região do presente trabalho. Os valores altimétricos dos pontos de controle foram comparados com os valores altimétricos dos pontos homólogos provenientes da TIN gerada pelos pontos LiDAR no programa SIG (ArcGIS 10.1).



Figura 6.45 - Localização dos pontos levantados em campo (pequenos triângulos) sobre a TIN obtida por pontos LiDAR e colorizada de acordo com faixas hipsométricas. Fonte: Elaborado pela autora.

Como os pontos de campo foram obtidos por tecnologia GNSS, os valores altimétricos originais foram alturas elipsoidais. Para evitar introdução de erros devido a conversão das alturas elipsoidais em altitudes ortométricas por meio de modelos

geoidais, os valores altimétricos dos pontos LiDAR também foram expressos em alturas elipsoidais.

A tabela 6.26 apresenta a identificação dos pontos de campo do trabalho de Paula (2017), suas coordenadas UTM, fuso 23S, a altura elipsoidal, a altura elipsoidal do ponto homólogo na TIN gerada pelos pontos LiDAR e as discrepâncias entre os valores altimétricos.

Tabela 6.26 - Pontos levantados em campo e suas discrepâncias altimétricas em relação à TIN. (Coordenadas UTM, Fuso 23S)

<b>Identificação Ponto</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>h<sub>pto</sub> (m)</b>	<b>h<sub>TIN</sub> (m)</b>	<b>Δh (m)</b>
PVA001	287.882,950	7.475.821,565	585,562	585,570	-0,008
PVA002	288.359,617	7.475.806,333	607,811	607,928	-0,117
PVA003	288.473,531	7.475.553,075	621,873	621,882	-0,009
PVA004	288.298,443	7.475.489,076	612,690	612,690	0,000
PVA006	287.621,138	7.475.410,758	586,307	586,290	0,017
PVA007	288.662,357	7.475.367,718	641,697	641,670	0,027
PVA008	287.212,676	7.475.378,306	587,203	587,177	0,026
PVA009	287.268,916	7.475.209,161	590,787	590,707	0,080
PVA010	288.332,600	7.473.618,801	645,617	645,652	-0,035
PVA011	287.465,522	7.475.307,223	591,433	591,424	0,009
PVA012	287.722,154	7.475.168,231	592,790	592,793	-0,003
PVA013	288.161,233	7.475.075,274	592,412	592,396	0,016
PVA014	288.464,151	7.475.155,476	624,980	624,931	0,049
PVA017	288.103,157	7.474.726,907	596,314	596,313	0,001
PVA018	287.771,160	7.474.791,730	599,272	599,295	-0,023
PVA019	287.352,359	7.474.955,188	593,753	593,845	-0,092
PVA020	287.766,022	7.474.504,734	606,112	606,164	-0,052
PVA021	288.096,688	7.474.407,802	610,535	610,614	-0,079
PVA022	288.644,036	7.473.725,733	652,411	652,436	-0,025
PVA024	288.413,043	7.474.158,807	613,781	613,775	0,006
PVA025	288.397,132	7.473.861,187	635,528	635,534	-0,006
PVA026	287.192,532	7.475.630,400	580,178	580,162	0,016
PVA027	287.556,057	7.475.670,091	576,289	576,353	-0,064
PVA028	288.126,386	7.475.699,898	598,272	598,277	-0,005
PVA029	287.332,045	7.475.311,389	588,602	588,567	0,035
PVA030	287.910,694	7.475.109,019	586,330	586,374	-0,044
PVA031	288.835,803	7.475.608,806	648,655	648,626	0,029
PVA032	287.960,896	7.474.626,002	606,062	606,077	-0,015
PVA033	287.634,236	7.474.618,597	601,863	601,681	0,182
PVA036	287.752,167	7.474.014,380	612,940	612,872	0,068
PVA037	288.059,850	7.473.853,970	623,095	623,071	0,024

<b>Identificação Ponto</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>h<sub>pto</sub> (m)</b>	<b>h<sub>TIN</sub> (m)</b>	<b>Δh (m)</b>
PVA038	288.264,769	7.474.155,695	617,932	617,884	0,048
PVA039	288.499,964	7.473.502,393	662,551	662,544	0,007

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores das discrepâncias altimétricas foram submetidos a uma análise estatística, com o resultado apresentado na tabela 6.27. O histograma das frequências dos  $\Delta h$ 's é apresentado na figura 6.46.

Tabela 6.27 - Estatística Descritiva do  $\Delta h$

Estatística Descritiva	
Média (m)	0,002
Erro padrão (m)	0,009
Mediana (m)	0,001
Moda (m)	0,016
Desvio padrão (m)	0,054
Média + 3* Desvio padrão (m)	0,164
Média - 3* Desvio padrão (m)	-0,160
Variância da amostra (m <sup>2</sup> )	0,003
Curtose (m)	3,186
Assimetria (m)	0,681
Intervalo (m)	0,299
Mínimo (m)	-0,117
Máximo (m)	0,182
Soma (m)	0,063
Número de amostras	33

Fonte: Elaborado pela autora.

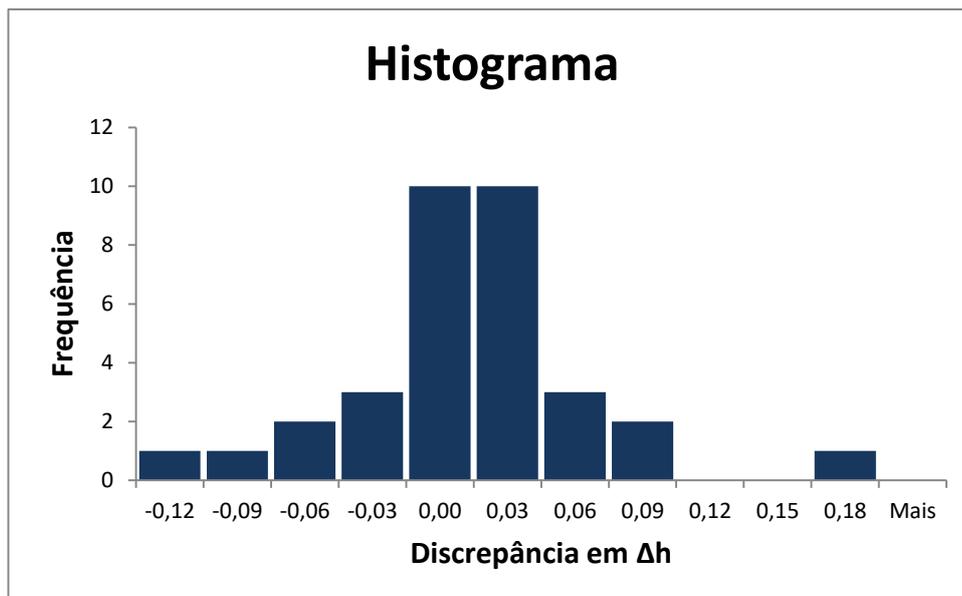


Figura 6.46 - Histograma das discrepâncias entre os valores altimétricos. Fonte: Elaborado pela autora.

A média da amostra foi de 2 mm e o desvio padrão foi de 5 cm. Somente uma medida (Ponto PVA033,  $\Delta h = 0,182$  m) ficou acima do intervalo aceitável de erro (definido pelo valor da média mais/menos três vezes o desvio padrão) que foi de 2 cm. Este ponto não foi eliminado.

A norma brasileira (Brasil, 1984) determina que 90% das medidas tomadas no produto cartográfico avaliado deverão apresentar erro inferior ao padrão de exatidão cartográfica estabelecido, atualmente o PEC-PCD. Aplicando o teste da norma brasileira aos valores de  $\Delta h$ , obteve-se como resultado que todos os valores da amostra são inferiores ao limite de 10% de erro, como mostra a tabela 6.28.

Tabela 6.28 - Teste de enquadramento nas classes do PEC-PCD

Escala	Classe PEC - PCD	PEC (m)	EP (m)	% da comp. $\Delta h$ superior ao PEC-PCD	Resultado*
1/1.000	A	0,27	0,17	0%	A
	B	0,50	0,33	0%	A
	C	0,60	0,40	0%	A
	D	0,75	0,50	0%	A

A = Aprovado

Fonte: Elaborado pela autora.

## 7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A avaliação da acurácia altimétrica prescrita por Merchant (1982), que é referência para a norma brasileira (BRASIL, 1984), exige, pelo menos, vinte amostras pontuais. O critério das amostras pontuais não é totalmente adequado para produtos cartográficos como os dados LiDAR em função da quantidade de pontos produzidos, que podem ser de milhões ou até bilhões. Para este caso, amostras maiores podem ser colhidas e é nesse sentido que foram propostos dois dos métodos apresentados neste trabalho. Neste capítulo os métodos de avaliação da acurácia altimétrica dos pontos LiDAR, desenvolvidos e/ ou testados neste trabalho, são comparados e discutidos quanto às suas vantagens, possíveis desvantagens, aplicações ou recomendações. Recordando, os métodos estudados foram:

- Método I: aplicação adaptada da norma brasileira, através de pontos cotados provenientes de uma base cartográfica e interpolação numa TIN. A adaptação consiste na forma de coletar os pontos para o controle. Envolve a comparação com uma base de referência com qualidade controlada, a TIN, e não com pontos coletados direta e imediatamente de fonte mais precisa (seção 6.3).
- Método II: aplicação da metodologia do NDEP/ASPRS dos EUA (seção 6.4).
- Método III: proposta de obtenção do erro altimétrico das curvas de nível aplicando o método dos retângulos equivalentes, avaliando o afastamento entre as curvas do produto a ser avaliado e as curvas de referência e fazendo a correlação entre o afastamento horizontal e o altimétrico através da declividade do modelo (TIN) em cada ponto (seção 6.5).
- Método IV: proposta de obtenção do erro altimétrico dos pontos LiDAR compreendidos num polígono formado por duas curvas de nível consecutivas (seção 6.6).

A tabela 7.1 apresenta, sucintamente, uma comparação entre os quatro métodos estudados neste trabalho.

Tabela 7.1 – Comparação entre os métodos testados

Método	Características Principais	Altimetria avaliada	Requeru pontos de controle?	Aquisição das amostras	Resultados alcançados (Média estatística)
I	Detecção de dados muito distantes da média ou do intervalo aceitável; fornece valores estatísticos.	Pontos LiDAR	Sim	500 medições	1,7 cm
II	Segue uma norma técnica bem elaborada; classifica em áreas com e sem vegetação; determina um valor de acurácia.	Pontos LiDAR	Sim	86 medições	1,7 cm
III (proposto)	Avalia diferenças entre curvas de nível geradas por pontos LiDAR e curvas de nível geradas por outras técnicas; fornece valores estatísticos.	Curvas de nível	Não	40 medições tomadas nos maiores afastamentos entre 14 curvas	1 cm a 19,5 cm
IV (proposto)	Avalia quantitativamente e categoriza os erros altimétricos de todos os pontos LiDAR compreendidos em duas curvas de nível (com relação à cota média das duas curvas); fornece valores estatísticos.	Pontos LiDAR	Não	Todos os pontos LiDAR compreendidos entre 22 curvas de nível	1 mm a 83,5 cm

Fonte: Elaborado pela autora.

Os métodos I e II avaliaram os erros altimétricos dos pontos LiDAR em relação a pontos de controle, por isso são pontuais. A diferença entre estes dois métodos está na forma de aquisição das amostras. No método I foram tomadas 500 medições porque o objetivo era avaliar a maior quantidade possível de amostras. Nestas medições, o tipo de cobertura do solo não foi levado em conta. Aos valores medidos aplicou-se uma análise estatística a fim de encontrar valores muito distantes da média (três vezes o desvio padrão) ou fora de um intervalo aceitável a fim de identificar visualmente tais medições sobre ortofotos e eliminá-las da amostra. Para empregar o método I não é necessário utilizar 500 amostras, como foi feito neste estudo. A quantidade das amostras precisa ser, no mínimo, o que a norma NDEP (2004) preconiza ou proporcional à área do projeto como determina a norma da ASPRS (2014).

No método II seguiu-se rigorosamente a norma do NDEP / ASPRS: foram tomadas 86 medições de três tipos de cobertura do solo. Este método é o único que

fornece um valor específico de acurácia (os outros três fornecem apenas valores estatísticos, como média e desvio padrão) por meio de fórmulas estatísticas. O cálculo da acurácia é diferente para dados obtidos em áreas sem vegetação e para dados em áreas com vegetação. Essa distinção é positiva e desejável, como se apontou. Aplicando uma análise estatística aos valores medidos, para solo nu, chegou-se a valores muito próximos do método I.

Essa norma NDEP / ASPRS não exige uma análise estatística para toda a amostra porque considera que as medidas tomadas em áreas com vegetação não seguem uma distribuição normal, como acontece nas áreas sem vegetação, o que é interessante ter em conta e a norma brasileira não considera. Mas, a análise estatística permite verificar a existência de erros sistemáticos e encontrar valores fora do intervalo aceitável (erros grosseiros), o que não é proporcionado pela norma NDEP, ainda que na realidade as normas americanas tenham como pressuposto a retirada prévia das tendências e dos erros grosseiros, sem apontar como. No experimento do referido método, seção 6.4, após aplicar uma análise estatística a toda a amostra, detectaram-se dois valores fora do intervalo aceitável (que deveriam ser descartados): um deles foi obtido numa área sem vegetação e o outro foi obtido numa área com vegetação.

A partir dos experimentos deste trabalho, recomenda-se empregar o método I (que é clássico) precedendo o método II (que é utilizado pela instituição norte americana de levantamentos – NDEP) para, conjuntamente, realizar a avaliação da acurácia altimétrica, principalmente quando se quer fazer distinção entre os diversos tipos de cobertura do solo.

O método III (que é a primeira proposta deste trabalho) avaliou as diferenças entre 14 curvas de nível interpoladas a partir de pontos LiDAR e suas curvas correspondentes obtidas por outras técnicas. As diferenças altimétricas foram medidas utilizando ferramenta computacional aliada ao conhecimento de tridimensionalidade proporcionado pelas redes triangulares irregulares – TIN's. As médias dos erros altimétricos variaram entre 1 cm e 19,5 cm. Os valores mais elevados de erros altimétricos revelados por este método ocorreram devido a três causas, consideradas possíveis: ou por causa da baixa densidade de pontos LiDAR (que pode ter sido afetada pela redução de pontos realizada pela empresa executora) que, conseqüentemente, gerou curvas de nível afastadas das curvas de referência, ou pelo ruído inserido na geração das curvas de nível pelo programa gratuito, ou

porque as curvas de nível de referência não estavam definidas corretamente. Tal investigação é uma continuidade da pesquisa sobre este método. Este método é global e não pontual: analisa todas as curvas do modelo e, portanto, o comportamento global do mesmo e não só em pontos localizados, o que é uma vantagem pela abrangência, que proporciona maior segurança quanto à representatividade.

O método IV (que é a segunda proposta deste trabalho) avaliou os erros altimétricos de todos os pontos LiDAR compreendidos numa área delimitada por duas curvas de nível consecutivas, correspondendo à equidistância de 1 metro, no caso. Neste método não houve necessidade de pontos de controle para comparar valores altimétricos porque o valor de referência foi a cota média das curvas de nível. A abundância de valores possibilitou o enquadramento, por analogia, dos 23 conjuntos de dados analisados na norma brasileira de exatidão cartográfica – PEC-PCD. As médias dos erros altimétricos dos 23 conjuntos de dados analisados variaram entre 1 mm e 83,5 cm. Somente em dois conjuntos de dados (nas duas áreas de cota mais elevada) a média passou de 50 cm. A vantagem deste método é poder avaliar uma grande quantidade de pontos LiDAR e não somente uma amostra que, em muitos casos, pode ser considerada pequena (20 pontos, frente a 10 milhões de pontos). Como a quantidade de valores a serem analisados é muito grande, a recomendação é fazer esta análise por meio de programas eficientes, automatizando tarefas.

Os métodos globais (III e IV) tiveram uma vantagem sobre os métodos locais (I e II) porque conseguiram detectar problemas localizados, percebidos pelos valores maiores das médias dos erros altimétricos: separação maior entre curvas de nível, que levam a erros altimétricos maiores em função da declividade (método III), e valores discrepantes dos valores altimétricos definidos pelas curvas de nível analisadas (método IV).

Os objetivos do trabalho foram atingidos, tanto do ponto de vista de estudo da teoria (conceitos, fundamentação teórica, estudo de recentes normas internacionais, como NDEP, ASPRS), bem como o desenvolvimento dos métodos de avaliação.

O caráter inovador da pesquisa foi propor dois métodos de avaliação da acurácia altimétrica do LiDAR tanto em sua formulação como em sua implementação prática. A aplicação a uma área de estudo (em Campinas), com produtos de controle, permitiu avaliar os métodos, compará-los entre si e fazer propostas de sua utilização.

Além disso, os quatro métodos estudados são de fácil reprodução. O que se percebeu foi que o primeiro, o terceiro e o quarto métodos se adéquam para uma

avaliação da acurácia altimétrica geral da área, e o segundo método se adéqua para uma avaliação da acurácia altimétrica em áreas, cuja cobertura ou tipo de uso, são homogêneos por categorias (vegetação, solo nu, etc.). Avaliando o modelo em áreas homogêneas, em função do tipo de cobertura do solo, as medidas de acurácia menor (comuns em áreas com vegetação) não degradam o produto como um todo.

Estes quatro métodos não exigem caros procedimentos de campo, e além disso, podem ser aplicados na engenharia de transporte, em projetos de loteamento, em outros projetos que requeiram acurácia altimétrica. Trabalhos futuros podem estudar precisamente e com mais detalhe as anomalias localizadas.

Como recomendação para trabalhos futuros propõe-se testar os métodos utilizados neste trabalho em outros tipos de relevo com maior declividade.

## REFERÊNCIAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **UNE 148002**. Información geográfica - Control de calidad posicional de datos espaciales. Proyecto. 2016.

ANDERSON, J.R., HARDY, E.E., ROACH, J.T., & WITMER, R.E. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, n. 964. USGS, Washington, D.C. Disponível em: <<http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>>. Acesso em: 16/05/2016.

ARIZA-LÓPEZ, F.; ATKINSON-GORDO, A. 2008. Variability of NSSDA estimations. **Journal of Surveying Engineering**, 134(2), pp.39–44.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). 1990. **ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(7): 1068-1070, Bethesda, MD.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). 2004. **ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data**, Bethesda, MD.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). 2014. **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**, Bethesda, MD.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). 2017. **Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**, Bethesda, MD.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). 2019. LAS Specification, version 1.4 – R.14. Disponível em: <[http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS\\_1\\_4\\_r14.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS_1_4_r14.pdf)> Acesso em: 31/05/2019.

ARIZA-LÓPEZ, F. J. **Calidad en la Información Geográfica (Introducción)**. En: Experto Universitario en Evaluación de la Información Geográfica (4a ed.). Máster Universitario en Evaluación y Gestión de la Calidad de la Información Geográfica (1ª ed.). Jaén: Universidad de Jaén, 2011.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne LASER scanning: basic relations and formulas. In.: **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 54 (1999), 199-215.

BERG, M.; CHEONG, O.; KREVELD, M.; OVERMARS, M. (2008). **Computational Geometry: Algorithms and Applications**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Third Edition, ISBN: 978-3-540-77973-5, DOI: 10.1007/978-3-540-77974-2.

BLITZKOW, D. ; MATOS, A. C. O. C. ; CINTRA, J. P. . Digital Terrain Model Evaluation and Computation of the Terrain Correction and Indirect Effect in South America. *Geoacta (Asociacion Argentina de Geofisicos y Geodestas)*, v. 34, p. 59-75, 2009.

BRASIL. Decreto-Lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providencias. 1967. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1965-1988/De10243.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De10243.htm)>. Acesso em: 30/07/2018.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. 1984. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-norma-pe.html>> Acesso em: 13/07/2018.

BRASIL. Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008. Institui, no âmbito do Poder Executivo Federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), e dá outras providências. 2008. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2008/decreto-6666-27-novembro-2008-584507-publicacaooriginal-107238-pe.html>> Acesso em: 10/07/2018.

BULMER, M. G. Principles of Statistics. Dover Publications, 1979.

CARVALHO, J. A. B; SILVA, D. C. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, Geodesia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, vol. 70, n. 2, pp.725-744, abr./jun., 2018.

CINTRA, J. P.; NERO, M. A. Proposta de interpretação e sugestão de complemento da norma de controle de qualidade brasileira. Em: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Macaé (RJ). Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005. v. XXII. p. 1-6.

CINTRA, J. P.; NERO, M. A. New method for positional cartographic quality control in digital mapping. **Journal of Surveying Engineering**, v. 141, n. 3, p. 04015001, 2015. R-1 EB80-N-72.004.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR/DSG), 2009. Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil (Perfil MGB). Disponível em: <[http://www.concar.gov.br/pdf/111@Perfil\\_MGB\\_homologado\\_nov2009\\_v1.pdf](http://www.concar.gov.br/pdf/111@Perfil_MGB_homologado_nov2009_v1.pdf)> Acesso em: 10/07/2018.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR/DSG), 2010. Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV v.2.1.3). Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_ADGV\\_Vs\\_2\\_1\\_3.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf)> Acesso em: 10/07/2018.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR/DSG), 2010. Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV v. 2.1.3). Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_EDGV\\_Vs\\_2\\_1\\_3.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_EDGV_Vs_2_1_3.pdf)> Acesso em: 10/07/2018.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR), 2010. Plano de Ação para Implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. Disponível em: <<http://www.concar.gov.br/pdf/PlanoDeAcaoINDE.pdf>> Acesso em: 10/07/2018.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR/DSG), 2016. Especificação Técnica para o Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG 1a ed.). Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf)> Acesso em: 10/07/2018.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR/DSG), 2016. Norma da especificação técnica para produtos de conjuntos de dados geoespaciais (ET-PCDG 2a ed.). Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_PCDG\\_2016\\_2aEdicao\\_Aprovada\\_Publicada\\_BE\\_7\\_16.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_PCDG_2016_2aEdicao_Aprovada_Publicada_BE_7_16.pdf)> Acesso em: 10/07/2018.

COMPUTATIONAL GEOMETRY ALGORITHMS LIBRARY (CGAL). 2017. *Triangulations and Delaunay Triangulations*. Disponível em: <<http://doc.cgal.org/latest/Manual/packages.html#PartTriangulationsAndDelaunayTriangulations>> Acesso em: 22/03/2017.

DEAKIN, R.E.; KILDEA, D.G., 1999. A Note on Standard Deviation and RMS, **Australian Surveyor**, 44:1, 74-79.

EDELSBRUNNER, H. *Geometry and Topology for Mesh Generation*. Cambridge, 2001.

FEMA, 2010. Procedure Memorandum n. 61 – **Standards for Lidar and Other High Quality Digital Topography**, Sept. 27, 2010, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C.

FERREIRA, F. R. **Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado**. 2014. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

FERREIRA, L. F., CINTRA, J. P. Quantificação de discrepância entre feições lineares por retângulos equivalentes. *Revista Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*, v. 1, n.51, p. 1-8, 1999.

FERREIRA DA SILVA, L. F. C. **Avaliação e integração de bases cartográficas para cartas eletrônicas de navegação terrestre**. 1998. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FGDC, 1998. **Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy**, Federal Geographic Data Committee, c/o/ USGS, Reston, VA.

FREIRE, J. A. **Reconstrução de superfície a partir de um conjunto não-organizado de pontos**. 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

GALO, M.; CAMARGO, P. de O. Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas. In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, 1994, Florianópolis-SC, 1994.

GARCIA-BALBOA, J. L. **Normas de Calidad**. En: *Experto Universitario em Evaluación de La Información Geográfica (4a ed.)*. Master Universitario em Evaluación y Gestión de La Calidad de La Información Geográfica (1a ed.). Jaen: Universidad de Jaen, 2011.

HEIDEMANN, H. K., 2012, Lidar Base Specification Version 1.0: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, chap B4, 63p.

HEIDEMANN, H. K., 2014, Lidar Base Specification Version 1.2, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, section B, chapter 4, 114p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Modelo de Ondulação Geoidal**. Disponível em:

<[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/oquee\\_geoide.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/oquee_geoide.shtm)> Acesso em: 01/03/2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>> Acesso em: 01/03/2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 2859-1:1999.** Sampling procedures for inspection by attributes - Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection. International Organization for Standardization (ISO), 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 2859-2:1985.** Sampling procedures for inspection by attributes - Part 2: Sampling plans indexed by limiting quality (LQ) for isolated lot inspection. International Organization for Standardization (ISO), 1985. R-2 EB80-N-72.004

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

LEMMENS, M. The Fierce Rise of Airborne Lidar. In: **GIM International Magazine**, Issue 1, Volume 31, p.16-19, Jan. 2017.

LOHANI, B., GHOSH, S., DASHORA, A. 2018. **A Review of Standards for Airborne LiDAR Data Acquisition, Processing, QA/QC, and Delivery.** In: Sarda N., Acharya P., Sen S. (Ed.) Geospatial Infrastructure, Applications and Technologies: India Case Studies. Springer, Singapore.

MAIA, J. L. **Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais.** 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2003.

MARANHÃO, V. C. **Modelagem e controle de qualidade de uma infraestrutura de dados espaciais para o Estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, 2013.

MARTHA, L. F.; PEREIRA, A. M. B. **Geometria computacional: principais algoritmos e predicados**. Apostila do curso Sistemas Gráficos para Engenharia. PUC-Rio, 2015. Disponível em: <[https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp\\_pub/lfm/CIV2802-GeometriaComputacional.pdf](https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/CIV2802-GeometriaComputacional.pdf)> Acesso em: 22/03/2017.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: TECHNICAL CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING. **Proceedings**. v. 1, p. 222-231, 1982.

MIL-STD-105E. **Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes**. May 10, 1989.

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, Curitiba, v. 15, n. 3, p.469-483, jul-set, 2009.

NATIONAL DIGITAL ELEVATION PROGRAM (NDEP), 2004. **Guidelines for Digital Elevation Data**, Version 1.0, National Digital Elevation Program (NDEP), May 10, 2004, c/o U.S. Geological Survey (USGS), Reston, VA. <<http://www.ndep.gov>> Acesso em: 01/02/2016.

NATIONAL MAP ACCURACY STANDARDS (NMAPS), 1947. Bureau of the Budget, 1947, Washington, D.C.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 1997, NOAA Technical Memorandum NOS NGS-58, Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoid Heights (Standards: 2 cm and 5 cm), National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 2009. Light Detection and Ranging (LiDAR) Requirements. <<https://www.ngs.noaa.gov/RSD/AirportSOW.pdf>>. Acesso em: 11/06/2019.

NATIONAL STANDARD FOR SPATIAL DATA ACCURACY (NSSDA), 1998. **Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)**, Federal Geographic Data Committee (FGDC), c/o U.S. Geological Survey (USGS), Reston, VA.

NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN), 2017. Federal Airborne LiDAR Data Acquisition Guideline version 1.0 (Draft). <[http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2017/rncan-nrcan/M113-1-117-eng.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/rncan-nrcan/M113-1-117-eng.pdf)>. Acesso em: 13/06/2019.

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. 2005. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005, 186p.

NERO, M. A.; CINTRA, J. P. Controle de qualidade de mapas: Visão geral das normas de diversos países. XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, Vol. 22, Sociedade Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, 1–16, 2005.

OUDE ELBERINK, S. J. 2010. **Acquisition of 3D topography: automated 3D road and building reconstruction using airborne laser scanner data and topographic maps**. Enschede, University of Twente, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), 2010. ITC Dissertation 167, p. 171. ISBN: 978-90-6164-287-9.

PAULA, C. F. 2017. **Comparação de diferentes densidades de pontos em um perfilamento LiDAR aerotransportado para ambiente urbano regular**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017, 229p.

PIRES, F. B. **Triangulações regulares e aplicações**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. DOI: 10.11606/D.55.2008.tde-26082008-163553. Acesso em: 28/03/2017.

POPPENGA, S.; WORSTELL, B. Evaluation of Airborne Lidar Elevation Surfaces for Propagation of Coastal Inundation: The Importance of Hydrologic Connectivity. **Remote Sensing**, 2015, 7(9), 11695-11711.

RENSLOW, M. S. **Manual of Airborne Topographic LiDAR**, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 2012.

ROBINSON, A. H.; MORRISON, J. L.; MUEHRCKE, P. C.; KIMERLING, A. J.; GUPTILL, S. C. **Elements of cartography**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

SERVIGNE, S.; LESAGE, N.; LIBOUREL, T. Quality components, standards, and metadata. In: DEVILLERS, R.; JEANSOULIN, R. (Ed.). **Fundamentals of spatial data quality**. [s.l.] ISTE, 2006. p. 179–210.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (Editors) **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2008.

STOKER, J.M.; COCHRANE, M.A.; ROY, D.P. Integrating Disparate Lidar Data at the National Scale to Assess the Relationships between Height above Ground, Land Cover and Ecoregions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 2014. 80; 59-70.

TERRASOLID Ltd., 2010. DTMaster Reference Manual. Disponível em: <[http://www.terrasolid.fi/en/users\\_guide/terrascan\\_users\\_guide](http://www.terrasolid.fi/en/users_guide/terrascan_users_guide)> Acesso em: 09/02/2016.

TOMMASELLI, A. M. G.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Análise da Exatidão Cartográfica da Carta Imagem de "São Paulo", Anais do V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal - RN, Brasil, vol.1, 253-257, 1988.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Engineering and design** - photogrammetric and LiDAR mapping. Manual EM 1110-1-1000. Washington: U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2015.

VOSSSELMAN, G.; MAAS, H. G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Boca Raton, CRC, 2010, ISBN: 978-1904445-87-6.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne LASER scanning – an introduction and overview. In.: **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 54 (1999), p. 68 – 82.

XAVIER, E. M. A.; ARIZA-LOPEZ, F. J.; URENA-CAMARA, M. A. WPS for positional quality control applying the method proposed in UNE 148002. In: VI Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales. **Anais...**, 2015. Sevilla, Spain.

## APÊNDICE A – Elementos a considerar no processamento de modelos digitais de elevação a partir de pontos LiDAR

Nesta seção serão abordados tópicos sobre os elementos que podem influenciar diretamente no processamento dos Modelos Digitais de Elevação, segundo a norma NDEP (2004).

### 1. Utilização de *breaklines*

As *breaklines* (linhas de quebra) são linhas de descontinuidade da declividade e devem ser introduzidas, a fim de se realizar uma boa modelagem. Em todo tipo de terreno e em diversas aplicações, rios, fundos de vale, beira de barrancos e linhas de cumeada (espigões) costumam representar essa feição do terreno (natural ou artificial).

Em aplicações hidrológicas, as linhas costeiras de rios, lagos e outras feições hidrográficas podem ser digitalizadas em formato vetorial para estabelecer *breaklines* 2D (x/y) entre a superfície da água e a inclinação do terreno que contém o volume de água.

Algumas *breaklines* adicionais podem ser digitalizadas para os eixos de córregos pequenos, valas de drenagem e feições hidrográficas semelhantes.

As *breaklines*, quando combinadas com curvas de nível, são usadas para estabelecer a direção do fluxo de rios e córregos.

Quando os valores altimétricos a montante e a jusante de um rio são conhecidas constituem-se em *breaklines* 2D, que podem ser convertidas para *breaklines* 3D ao decrescerem gradualmente da superfície a montante para a superfície a jusante.

Todas as *breaklines*, 2D ou 3D, podem ser gravadas num MDE para impor os padrões conhecidos da drenagem e para representar as áreas submersas. Isso define a utilização de um modelo para impor restrições à hidrografia, chamado em inglês de *hydro-enforcement*.

As estradas, ferrovias e pontes também podem ser digitalizadas em formato vetorial para estabelecer *breaklines* que podem ser usados para melhorar a precisão de um MDE genérico ou especificamente para modelos hidrológicos.

Uma estrada pode ter uma *breakline* suave ao longo do eixo central, fazendo com que a água escoe para fora da estrada em valas de drenagem (canaletas), que determinam *breaklines* rígidas em ambos os lados da estrada.

As pontes (e as galerias de concreto ou bueiros) precisam ser cuidadosamente digitalizadas para suprimir os valores altimétricos ao longo das pontes ou para interromper as pontes com *breaklines* a fim de mostrar que a água passa por baixo delas.

Se a altimetria do modelo for mantida ao longo da parte superior de uma ponte, o modelo digital construiria, de forma errada, a superfície represada pela ponte, e a água não seria capaz de fluir por baixo dela.

Conseqüentemente, quando se produzem modelos digitais de terreno, para efeitos hidrológicos, as pontes necessitam da aplicação de um modelo de *hydro-enforcement*, que corresponde a utilizar as cotas do terreno abaixo da ponte, e da mesma forma devem ser tratados os bueiros ou galerias que passam por baixo das estradas.

Considerando que as pontes e as grandes galerias de concreto são evidentes na maioria das imagens, os canos das tubulações dessas estruturas frequentemente não são visíveis, tornando difícil para os modelos de *hydro-enforcement* mostrar todas as feições da drenagem associadas a estradas e ferrovias.

## 2. A hidrografia

O *hydro-enforcement*, realizado para representar o fluxo de água nos modelos digitais de superfície, é requerido quando os sistemas de sensoriamento remoto detectam estruturas artificiais e irregularidades do terreno, incluindo as linhas costeiras que sofrem a influência das marés.

Existem diferentes formas de realizar um *hydro-enforcement*, que podem incluir qualquer uma das seguintes opções: nivelamento das lagoas, lagos e reservatórios que devem ter a superfície da água plana em vez de ondulações; rios, riachos e canais estreitos que deveriam representar o fluxo descendente da água em vez de fluxo ora ascendente, ora descendente, em função de imprecisões, por exemplo; estruturas feitas pelo homem que efetivamente impedem o fluxo da água (no caso de edifícios), em oposição a outras estruturas que apenas parecem estar impedindo o fluxo da água (no caso de pontes e viadutos); e buracos e depressões do relevo que realmente

existem em oposição a poças artificiais que enganam ao representar drenos de saída naturais ou bueiros. Cada um destes tópicos é explicado nos itens seguintes.

a) Corpos de água

Os corpos d'água naturalmente ocorrem em áreas de altimetria constante, considerando que as correntes e outras forças físicas não alterem significativamente a superfície da água.

Tradicionalmente era atribuído um valor de altimetria zero à superfície dos oceanos, baías, ou estuários. As técnicas modernas de posicionamento por satélites mostram que, do ponto de vista físico, o nível médio do mar, equivale a diferentes altitudes ao longo de diferentes linhas de costa por causa das variações da topografia do oceano, das correntes e dos ventos.

O valor de altimetria de lagoas, lagos e reservatórios são conhecidos ou estimados, e suas margens podem ser consideradas como *breaklines* de altimetria constante.

A localização e a forma das margens de um corpo d'água são normalmente determinadas a partir de ortofotos digitais ou outra fonte de imagem georreferenciada.

b) Rios e córregos

Rios e córregos devem ser retratados, por sua própria natureza com seu fluxo descendente da água, mas em alguns casos a declividade é pequena e as cotas tomadas no terreno adjacente podem indicar um fluxo contrário ao real. Estas feições, em função de sua largura e da escala, podem ser representadas como de margem simples ou dupla.

A localização e a forma das margens duplas são normalmente determinadas a partir de ortofotos digitais (modelo estereoscópico na aerofotogrametria) ou outra fonte de imagem georreferenciada. Estas margens são consideradas *breaklines*, podendo ocorrer de três maneiras descritas a seguir.

b.1) Por escalonamento: quando as margens duplas de rios forem interceptadas por curvas de nível podem-se determinar polígonos, delimitados pelas margens e pelas curvas de nível que cortam o rio a jusante e a montante, e atribuir a eles o mesmo valor altimétrico da curva de nível do cruzamento inferior. Esta é uma abordagem simples, mas faz com que os polígonos da drenagem sejam escalonados de acordo com o intervalo das curvas de nível.

b.2) Por interpolação: quando as margens duplas de rios forem interceptadas por curvas de nível, as curvas de nível podem ser usadas para estabelecer os valores altimétricos em pontos discretos ao longo das margens duplas, representadas por *breaklines*. Os valores altimétricos são então interpolados linearmente para cada vértice da margem do rio entre pontos discretos. As *breaklines* da margem do rio passam a ser *breaklines* em 3D nas quais a altimetria diminui gradualmente de montante para jusante, configurando um modelo de *hydro-enforcement*. Os valores altimétricos do eixo central do rio são, então, interpolados a partir do valor altimétrico nas margens mais próximas.

b.3) Por métodos alternativos: quando não existirem curvas de nível, a localização e a forma das margens duplas ainda podem ser determinadas a partir de ortofotos digitais ou outra fonte de imagem georreferenciada. Em seguida, métodos alternativos podem ser usados para estimar os valores altimétricos da água em vários locais ao longo do curso do rio para a obtenção do declive das margens em 3D. Com o uso do LiDAR, por exemplo, alguns pulsos refletem fora das ondulações da água. Quando há vários pulsos de retorno LiDAR sobre a água, desde que representem valores altimétricos consistentes, estes valores podem ser utilizados para estimar a altimetria da água nesses locais. Opcionalmente, os valores altimétricos mais baixos ao longo das ribanceiras em intervalos ou locais selecionados podem ser utilizados para o mesmo fim, e em seguida, interpolados para representar, de forma contínua, o declive das margens como uma *breakline* em 3D.

### c) Canais estreitos

Quando se deseja obter a continuidade da drenagem a jusante, canais de drenagem estreitos podem ser compelidos para uma única *breakline* em 3D. A aplicação forçada da *breakline* nesta situação assegura que não há falsas represas ou poças representadas no modelo. Essas feições incorretas comumente são interpretadas em superfícies de altimetria originadas ou representadas por pontos discretos de forma aleatória ou uniformemente espaçados. Uma *breakline* da drenagem, obtida como descrito no item b, pode ser usada para representar o canal verdadeiro da drenagem numa TIN ou pode ser utilizada para atribuir o valor altimétrico mais baixo do local no ponto mais próximo da grade altimétrica.

### 3. Estruturas feitas pelo homem

Nessa seção será apresentado o uso de algumas estruturas feitas pelo homem no processamento dos Modelos Digitais de Elevação.

#### a) Edificações

Para a maioria das aplicações, um modelo digital do terreno natural significa que os pontos altimétricos sobre edifícios (e árvores) são removidos, os porões (ou pequenos sótãos, no topo das edificações) são desconsiderados, e o terreno onde existem edifícios é suavizado e interpolado a partir de valores altimétricos do solo em torno dos edifícios.

No entanto, para a modelagem das áreas sujeitas a inundações, os valores altimétricos de edifícios podem ser mantidos para mostrar que os edifícios ocupam espaços onde as cheias fluem e eles também impedem o fluxo natural das enchentes.

#### b) Pontes

Uma vez que a maioria dos sensores detecta a primeira superfície refletora, os topos das pontes e das estruturas de apoio acabam sendo representados nos dados originais. Quando se deseja representar pontes para a modelagem da rede rodoviária elas devem ser especificamente solicitadas para o processamento do modelo de superfície. Se, no entanto, a modelagem da água for o objetivo principal, é preferível desconsiderar a ponte e substituir os valores altimétricos sobre ela por valores próximos a superfície do rio.

#### c) Viadutos

Os viadutos apresentam os mesmos problemas que as pontes. O processamento para os viadutos deve ser especificamente documentado.

#### d) Bueiros

Bueiros normalmente não são representados nos Modelos Digitais de Elevação. Considerando que as pontes e as grandes galerias de concreto são evidentes na maioria das imagens, bueiros estão muitas vezes escondidos, tornando difícil para os modelos de *hydro-enforced* mostrar todas as feições de drenagem associadas a estradas e ferrovias. Para algumas aplicações de drenagem, em escalas

maiores, pode ser desejável modelar a superfície do bueiro, mas geralmente o custo da coleta de informações necessárias para representar os bueiros supera em muito os benefícios deste tipo de modelagem. Bueiros de grande porte podem ser mais facilmente identificados a partir de fotografias, o que permite que a rede de drenagem oculta seja modelada de modo mais acessível.

#### **4. Feições terrestres especiais**

As feições terrestres especiais são feições naturais que exigem uma atenção especial.

##### **a) Sumidouros**

Os sumidouros, embora raros, devem ser verificados e, sempre que possível devem ser representados como depressões no modelo de superfície.

##### **b) Pontes naturais (arcos rochosos)**

Geralmente, a estrutura de uma ponte natural é representada no modelo de superfície. Quando a modelagem do fluxo d'água é a principal aplicação do modelo de superfície, é preferível considerar as pontes naturais como pontes artificiais e representar somente o curso d'água.

#### **5. Os artefatos**

Um fator de qualidade importante para um MDE é a sua "limpeza" de artefatos. Os artefatos são superfícies detectáveis remanescentes de edifícios, árvores, torres, postes ou outras feições, que tenham valor altimétrico, num modelo de superfície do solo nu.

Elas também podem ser anomalias artificiais detectáveis que são introduzidas num modelo de superfície através de técnicas específicas de coleta ou processamento (por exemplo, efeitos de uma cultura enfileirada, efeitos de estrela e de declive na interpolação de linhas multidirecionais, deslocamentos de junção de bordas, ou facetas triangulares detectáveis causadas quando dosséis de árvores são eliminados dos dados LiDAR).

A maioria dos artefatos é removida no pós-processamento automatizado. No entanto, a limpeza final dos últimos 10% dos artefatos, por serem feitos de forma manual, pode requerer 90% do orçamento do pós-processamento. Devido aos custos,

os usuários às vezes aceitam uma quantidade moderada de artefatos, enquanto outros consideram artefatos totalmente inaceitáveis.

A limpeza pode ser especificada como uma porcentagem da área total. No entanto, quantificar e testar um limite aceitável de artefatos é um processo difícil, subjetivo e demorado. Tendo em vista que os artefatos são tão difíceis de quantificar, é melhor que o usuário discuta com o produtor dos dados sobre os tipos de artefatos que são aceitáveis (caso existam), e quais artefatos são inaceitáveis e devem ser eliminados.

## **6. Áreas sem valores altimétricos ou de credibilidade duvidosa**

No processamento de um Modelo Digital de Elevação podem-se obter dados incomuns como áreas sem dados altimétricos ou áreas com valores altimétricos duvidosos.

### **a) Áreas sem dados: intencional / não intencional**

As informações específicas devem ser fornecidas pelo produtor dos dados que diferencia se a falta de dados é intencional ou não intencional. Algumas indicações, que descrevem onde estas áreas estão no produto de entrega, devem ser fornecidas fora do modelo, por exemplo, no formulário de metadados ou como um polígono.

Exemplos de áreas intencionalmente sem dados seriam áreas fora da área do projeto, grandes massas d'água nos blocos de MDE que, deliberadamente, não são coletadas para diminuir os custos de produção ou áreas de informações restritas, como as bases militares.

Áreas não intencionalmente sem dados são aquelas onde ventos fortes, erros do piloto ou de navegação causam "buracos" entre faixas fotogramétricas adjacentes. Para ambas as áreas sem dados, intencionais ou não intencionais, pode ser utilizado um valor altimétrico diferenciado como, por exemplo, "-99999".

### **b) Áreas duvidosas**

São as áreas para as quais existe um grau relativamente baixo de confiança dos valores altimétricos, como por exemplo, áreas de cultivo de milho, mangue ou de vegetação impenetrável. Nestas áreas, os produtores questionam se os valores altimétricos compiladas ou detectadas representam o solo nu. Algumas indicações,

que descrevem onde estas áreas estão no produto de entrega, devem ser fornecidas fora do modelo, por exemplo, no formulário de metadados ou como um polígono.

**APÊNDICE B – Lote de amostragem para o controle altimétrico do LiDAR**  
(Coordenadas UTM, Fuso 23S)

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
138	291.040,067	7.473.950,723	622,324	622,322	-0,002
139	291.062,787	7.473.868,931	626,060	626,089	0,029
206	291.034,387	7.473.843,939	623,340	623,237	-0,103
371	291.054,623	7.472.566,919	641,682	641,657	-0,025
372	291.030,979	7.472.502,317	641,376	641,366	-0,010
438	291.055,971	7.472.796,542	638,343	638,396	0,053
442	291.071,875	7.472.729,518	639,936	639,983	0,047
625	290.981,343	7.476.991,201	591,422	591,559	0,137
627	291.080,959	7.476.964,081	590,556	590,550	-0,006
663	291.049,209	7.476.424,330	589,390	589,366	-0,024
664	290.996,292	7.476.876,107	583,230	583,282	0,052
665	290.971,818	7.476.895,289	583,452	583,524	0,072
675	291.053,839	7.476.606,893	585,361	585,404	0,043
678	291.063,761	7.476.521,565	586,231	586,215	-0,016
702	290.985,708	7.476.599,617	585,794	585,729	-0,065
706	291.020,766	7.476.696,190	584,683	584,633	-0,050
707	290.994,969	7.476.704,128	584,449	584,495	0,046
708	290.974,464	7.476.755,721	584,034	584,044	0,010
716	291.082,282	7.476.654,518	585,195	585,286	0,091
838	291.075,540	7.475.357,980	588,236	588,274	0,038
1003	291.026,860	7.475.174,250	596,891	596,895	0,004
1138	291.025,299	7.472.327,372	639,713	639,677	-0,036
1176	290.802,642	7.472.277,388	640,372	640,588	0,216
1233	290.680,511	7.476.966,595	583,406	583,385	-0,021
1234	290.691,624	7.477.071,370	586,474	586,441	-0,033
1235	290.676,542	7.477.041,207	585,325	585,409	0,084
1236	290.674,161	7.476.996,757	584,260	584,282	0,022
1240	290.560,654	7.477.018,982	596,476	596,417	-0,059
1242	290.583,673	7.477.026,920	596,633	596,649	0,016
1244	290.586,848	7.477.072,164	598,179	598,153	-0,026
1250	290.894,824	7.477.070,576	609,376	609,387	0,011
1262	290.535,916	7.476.409,778	578,686	578,683	-0,003
1265	290.531,286	7.476.532,810	579,131	579,145	0,014
1272	290.789,916	7.476.438,882	579,942	579,979	0,037
1273	290.723,109	7.476.680,977	588,488	588,474	-0,014
1274	290.784,625	7.476.710,742	587,504	587,496	-0,008
1277	290.801,161	7.476.653,195	589,368	589,384	0,016

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
1278	290.830,265	7.476.610,200	589,454	589,462	0,008
1292	290.592,801	7.476.741,831	583,744	583,731	-0,013
1295	290.638,442	7.476.707,435	582,824	582,783	-0,041
1297	290.570,973	7.476.704,789	583,700	583,667	-0,033
1304	290.562,374	7.476.845,019	578,406	578,405	-0,001
1305	290.582,218	7.476.823,190	578,497	578,498	0,001
1311	290.707,499	7.476.934,845	583,663	583,670	0,007
1312	290.674,955	7.476.916,588	583,332	583,360	0,028
1317	290.680,776	7.476.797,393	580,276	580,413	0,137
1324	290.820,344	7.476.885,368	581,771	581,724	-0,047
1331	290.824,974	7.476.402,502	579,813	579,808	-0,005
1339	290.850,771	7.476.583,081	588,173	588,166	-0,007
1341	290.900,380	7.476.585,726	588,032	588,012	-0,020
1344	290.897,383	7.476.636,849	585,194	585,216	0,022
1351	290.871,276	7.476.775,565	582,921	582,903	-0,018
1482	290.666,960	7.475.459,600	587,239	587,249	0,010
1504	290.553,260	7.475.375,580	598,442	598,463	0,021
1507	290.647,640	7.475.351,630	588,769	588,752	-0,017
1571	290.647,190	7.475.076,130	594,659	594,656	-0,003
1573	290.699,990	7.475.207,700	591,663	591,750	0,087
1589	290.527,810	7.475.206,270	603,332	603,374	0,042
1629	290.741,320	7.474.717,840	585,122	585,142	0,020
1655	290.606,113	7.474.560,758	585,386	585,389	0,003
1660	290.737,890	7.474.573,254	585,428	585,458	0,030
1664	290.678,817	7.474.627,782	585,784	585,810	0,026
1667	290.988,947	7.474.636,870	606,253	605,953	-0,300
1677	290.913,970	7.474.352,869	590,452	590,738	0,286
1710	290.696,993	7.474.173,380	590,204	590,271	0,067
1743	290.887,842	7.473.979,123	608,681	608,751	0,070
1781	290.677,681	7.473.632,642	594,781	594,828	0,047
1788	290.816,274	7.474.008,660	603,029	602,957	-0,072
1793	290.796,962	7.473.808,723	605,733	605,690	-0,043
1796	290.626,561	7.473.907,555	595,218	595,107	-0,111
1815	290.948,050	7.473.057,823	634,714	634,834	0,120
1817	291.000,307	7.473.240,720	623,419	623,504	0,085
1857	290.795,826	7.473.416,801	609,256	609,200	-0,056
1871	290.560,673	7.473.338,417	594,742	594,691	-0,051
1884	290.759,474	7.473.264,576	613,810	613,886	0,076
1904	290.836,722	7.473.373,633	613,135	613,151	0,016
1906	291.003,715	7.473.178,240	627,894	627,968	0,074
1909	290.800,370	7.473.016,927	628,311	628,385	0,074

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
1912	290.875,346	7.473.026,015	631,840	631,591	-0,249
1958	290.838,994	7.472.898,783	625,689	625,517	-0,172
1959	290.946,914	7.472.722,702	636,434	636,443	0,009
1962	290.953,730	7.472.795,406	639,829	639,812	-0,017
1963	290.969,635	7.472.848,798	640,899	640,878	-0,021
1966	290.875,346	7.472.506,861	624,121	624,260	0,139
1970	290.877,618	7.472.687,486	631,284	631,138	-0,146
1974	290.996,899	7.472.873,791	641,473	641,432	-0,041
1975	291.011,667	7.472.894,239	641,655	641,629	-0,026
1989	290.521,487	7.472.803,721	600,955	600,886	-0,069
1995	290.560,259	7.472.677,887	607,796	607,840	0,044
1998	290.808,322	7.472.589,789	620,340	620,387	0,047
1999	290.733,154	7.472.590,731	618,429	618,374	-0,055
2009	290.674,273	7.472.696,574	613,289	613,384	0,095
2015	290.698,901	7.472.775,203	620,466	620,323	-0,143
2020	290.932,194	7.472.491,253	638,741	638,782	0,041
2023	290.968,499	7.472.635,230	634,726	634,863	0,137
2026	290.942,370	7.472.629,550	630,796	630,797	0,001
2029	291.008,321	7.472.740,221	639,173	639,177	0,004
2031	290.959,411	7.472.504,589	638,375	638,433	0,058
2052	290.782,102	7.472.470,345	626,646	626,908	0,262
2075	290.250,827	7.476.621,445	578,245	578,220	-0,025
2089	290.024,872	7.476.880,076	577,783	577,785	0,002
2097	290.062,972	7.476.854,676	578,136	578,144	0,008
2098	290.024,078	7.476.838,801	578,388	578,367	-0,021
2103	289.916,128	7.476.838,007	577,735	577,723	-0,012
2127	289.996,297	7.476.781,651	579,537	579,514	-0,023
2129	290.070,116	7.476.749,107	578,247	578,283	0,036
2135	290.167,483	7.476.614,169	579,337	579,322	-0,015
2147	290.123,827	7.476.450,127	580,633	580,700	0,067
2150	290.241,566	7.476.390,596	579,885	579,866	-0,019
2151	290.393,041	7.476.475,263	580,530	580,519	-0,011
2157	290.228,337	7.476.583,742	578,249	578,245	-0,004
2161	290.366,582	7.476.563,237	578,332	578,339	0,007
2162	290.340,124	7.476.600,940	578,427	578,423	-0,004
2170	290.116,947	7.476.772,126	578,164	578,184	0,020
2277	290.147,380	7.475.499,920	628,798	628,764	-0,034
2284	290.174,448	7.475.512,458	627,337	627,319	-0,018
2298	290.387,687	7.475.517,273	611,856	611,904	0,048
2343	290.044,940	7.475.256,760	638,065	638,069	0,004
2349	290.312,760	7.475.287,920	620,127	620,127	0,000

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
2353	290.424,060	7.475.329,640	611,878	611,864	-0,014
2369	290.022,540	7.475.505,050	633,626	633,632	0,006
2398	289.981,500	7.475.233,340	640,215	640,172	-0,043
2415	290.142,119	7.475.146,514	625,389	625,364	-0,025
2476	290.021,100	7.475.172,510	632,969	632,911	-0,058
2494	290.107,407	7.474.626,646	625,896	625,973	0,077
2497	290.367,552	7.474.627,782	599,482	599,233	-0,249
2507	290.021,070	7.474.415,349	638,146	638,202	0,056
2514	289.990,398	7.474.447,157	640,880	640,870	-0,010
2518	289.974,494	7.474.570,982	640,306	640,450	0,144
2525	289.960,862	7.474.155,204	621,993	621,940	-0,053
2533	289.983,582	7.474.280,165	633,666	633,655	-0,011
2573	290.210,783	7.474.233,589	627,148	627,191	0,043
2583	290.369,824	7.474.171,108	616,895	617,172	0,277
2595	290.196,015	7.474.389,221	620,824	621,035	0,211
2598	289.968,814	7.473.996,163	624,201	624,385	0,184
2631	290.392,544	7.473.606,514	592,118	592,508	0,390
2649	290.205,103	7.473.949,587	594,232	594,518	0,286
2696	290.039,246	7.473.721,250	637,637	637,633	-0,004
2757	290.445,521	7.473.224,867	595,102	595,650	0,548
2769	290.385,728	7.473.395,217	624,215	624,319	0,104
2774	290.393,680	7.472.978,303	601,586	601,761	0,175
2777	290.149,439	7.472.998,751	656,208	655,911	-0,297
2797	290.071,010	7.473.053,822	670,491	670,562	0,071
2799	290.076,343	7.473.176,467	664,794	664,795	0,001
2822	290.199,987	7.473.292,600	644,874	644,992	0,118
2833	290.133,535	7.472.505,725	626,005	625,963	-0,042
2841	290.220,318	7.472.775,203	618,170	618,336	0,166
2843	290.114,223	7.472.816,990	637,134	637,128	-0,006
2851	290.420,945	7.472.700,533	608,049	608,255	0,206
2872	290.142,998	7.472.592,568	622,941	622,916	-0,025
2873	290.121,668	7.472.544,577	619,834	619,902	0,068
2875	290.105,135	7.472.417,117	619,634	619,615	-0,019
2879	290.401,101	7.472.373,772	642,956	642,979	0,023
2930	290.410,951	7.472.231,298	647,785	647,948	0,163
2938	290.494,937	7.472.296,620	642,950	642,936	-0,014
3053	290.033,603	7.477.104,708	576,564	576,497	-0,067
3060	289.980,422	7.477.038,826	577,303	577,289	-0,014
3064	290.084,404	7.476.996,757	577,385	577,339	-0,046
3067	290.143,935	7.476.990,407	577,626	577,594	-0,032
3069	289.848,398	7.474.611,878	653,307	653,396	0,089

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
3076	289.537,132	7.474.401,717	665,519	665,520	0,001
3078	289.725,709	7.474.380,133	658,731	658,788	0,057
3079	289.912,014	7.474.101,812	630,188	630,235	0,047
3082	289.929,054	7.474.447,157	645,410	645,536	0,126
3098	289.559,852	7.474.088,180	671,500	671,692	0,192
3103	289.437,164	7.474.307,429	669,395	669,390	-0,005
3106	289.451,932	7.474.174,516	674,519	674,636	0,117
3117	289.480,332	7.473.743,970	688,569	688,621	0,052
3120	289.543,948	7.474.004,116	674,662	674,770	0,108
3121	289.597,341	7.473.874,611	674,632	674,759	0,127
3129	289.829,086	7.473.880,291	653,906	653,996	0,090
3137	289.489,420	7.473.999,572	678,890	678,938	0,048
3138	289.428,076	7.473.862,115	686,961	686,973	0,012
3222	289.916,558	7.473.542,898	651,998	652,294	0,296
3228	289.729,736	7.473.332,440	689,204	689,296	0,092
3232	289.737,735	7.473.255,120	694,144	694,270	0,126
3236	289.780,394	7.473.216,460	691,293	691,418	0,125
3238	289.809,773	7.472.994,207	692,360	692,205	-0,155
3255	289.773,478	7.473.163,483	696,773	696,807	0,034
3276	289.547,101	7.473.308,444	698,689	698,778	0,089
3292	289.512,140	7.473.235,040	699,451	699,980	0,529
3293	289.557,766	7.473.241,789	699,186	699,171	-0,015
3319	289.799,057	7.473.024,493	695,698	695,702	0,004
3330	289.446,252	7.472.971,487	686,828	686,678	-0,150
3333	289.455,081	7.472.894,473	680,227	680,111	-0,116
3365	289.939,637	7.473.363,509	661,662	661,847	0,185
3366	289.947,032	7.473.308,444	666,498	666,587	0,089
3391	289.945,698	7.472.856,523	668,650	668,847	0,197
3399	289.904,062	7.472.497,773	633,628	634,022	0,394
3400	289.927,035	7.472.540,577	627,991	628,104	0,113
3424	289.515,936	7.472.797,900	666,968	666,889	-0,079
3440	289.720,561	7.472.570,816	644,747	644,682	-0,065
3470	289.934,111	7.472.331,439	639,605	639,642	0,037
3669	289.852,628	7.477.065,020	578,048	578,045	-0,003
3677	289.715,309	7.477.006,282	586,681	586,709	0,028
3685	289.551,796	7.476.945,957	597,303	597,335	0,032
3689	289.697,847	7.477.085,658	584,650	584,647	-0,003
3691	289.697,053	7.477.042,795	585,397	585,377	-0,020
3693	289.579,578	7.477.110,264	590,997	591,193	0,196
3695	289.389,871	7.477.057,082	602,215	602,244	0,029
3715	289.835,166	7.476.814,988	583,485	583,509	0,024

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
3717	289.885,172	7.476.893,570	579,471	579,405	-0,066
3718	289.846,278	7.476.912,620	580,803	580,791	-0,012
3723	289.579,445	7.476.425,653	604,408	604,380	-0,028
3729	289.462,011	7.476.466,731	607,233	607,254	0,021
3730	289.482,607	7.476.484,969	606,690	606,689	-0,001
3739	289.499,200	7.476.503,961	606,266	606,227	-0,039
3740	289.535,127	7.476.470,632	605,707	605,702	-0,005
3742	289.678,003	7.476.594,987	594,238	594,308	0,070
3743	289.572,434	7.476.923,732	594,940	595,003	0,063
3744	289.889,141	7.476.851,501	578,615	578,565	-0,050
3751	289.504,339	7.476.477,992	606,868	606,921	0,053
3752	289.486,841	7.476.643,273	604,700	604,695	-0,005
3755	289.701,154	7.476.344,955	602,076	602,059	-0,017
3757	289.609,211	7.476.339,002	606,426	606,450	0,024
3839	289.669,555	7.475.345,995	657,623	657,655	0,032
3850	289.433,618	7.475.398,273	658,521	658,565	0,044
3855	289.628,283	7.475.507,643	652,921	652,881	-0,040
3897	289.911,670	7.475.500,540	640,062	640,026	-0,036
3919	289.515,010	7.475.145,030	659,948	659,949	0,001
3954	289.522,900	7.474.778,410	668,027	668,030	0,003
3965	289.570,040	7.475.003,530	662,143	662,156	0,013
3990	289.224,612	7.477.111,587	603,077	603,168	0,091
3992	289.311,289	7.476.934,845	604,831	604,857	0,026
3996	289.328,752	7.477.046,764	603,560	603,617	0,057
3997	289.359,708	7.477.001,520	603,400	603,569	0,169
4000	289.267,633	7.476.967,389	604,414	604,448	0,034
4001	289.187,570	7.476.970,828	604,345	604,354	0,009
4004	288.947,328	7.476.923,203	605,704	605,700	-0,004
4040	288.839,378	7.477.097,828	604,719	604,769	0,050
4042	288.866,894	7.476.989,878	605,104	605,077	-0,027
4043	288.905,682	7.477.032,476	604,736	604,700	-0,036
4045	288.906,053	7.477.135,928	604,232	604,206	-0,026
4047	288.952,620	7.477.079,837	604,211	604,248	0,037
4052	289.099,728	7.477.099,945	603,105	603,201	0,096
4053	289.095,389	7.477.052,320	603,609	603,716	0,107
4060	288.835,144	7.476.932,728	605,240	605,247	0,007
4061	289.353,358	7.477.050,732	603,121	603,121	0,000
4062	289.286,683	7.476.791,176	606,666	606,652	-0,014
4063	289.318,433	7.476.736,407	606,854	606,856	0,002
4071	289.315,864	7.476.615,950	607,701	607,724	0,023
4073	289.262,606	7.476.401,179	614,242	614,295	0,053

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
4076	289.319,266	7.476.580,108	608,102	608,141	0,039
4078	289.319,492	7.476.499,737	607,809	607,805	-0,004
4082	289.251,499	7.476.533,288	607,988	607,997	0,009
4083	289.229,581	7.476.513,323	608,620	608,612	-0,008
4085	289.235,486	7.476.614,169	607,389	607,368	-0,021
4086	289.273,189	7.476.641,950	607,446	607,435	-0,011
4090	289.331,927	7.476.904,682	604,265	604,257	-0,008
4091	289.263,664	7.476.876,901	605,641	605,649	0,008
4107	289.116,027	7.476.692,751	607,200	607,210	0,010
4108	289.086,658	7.476.747,519	607,138	607,123	-0,015
4133	289.217,620	7.476.499,023	608,277	608,284	0,007
4164	288.863,614	7.476.911,032	605,372	605,387	0,015
4190	289.308,114	7.476.905,476	604,663	604,666	0,003
4191	289.212,997	7.476.630,706	607,072	607,070	-0,002
4251	289.341,444	7.475.465,684	658,666	658,612	-0,054
4257	288.899,330	7.475.154,100	645,317	645,307	-0,010
4270	289.267,560	7.475.181,370	658,621	658,643	0,022
4276	289.123,700	7.474.848,520	652,669	652,651	-0,018
4290	289.325,835	7.474.647,094	659,005	659,075	0,070
4293	288.901,050	7.475.044,870	647,855	647,845	-0,010
4309	289.071,580	7.474.722,500	645,804	645,853	0,049
4319	288.943,002	7.474.617,558	635,396	635,465	0,069
4321	289.033,882	7.474.642,550	643,532	643,402	-0,130
4323	289.172,475	7.474.573,254	653,820	653,785	-0,035
4325	289.382,636	7.474.582,342	660,272	660,282	0,010
4333	289.395,132	7.474.251,765	672,722	672,826	0,104
4343	289.284,939	7.474.238,133	673,825	673,867	0,042
4344	289.392,860	7.474.219,956	673,658	673,690	0,032
4345	289.341,739	7.474.083,636	682,272	682,505	0,233
4348	289.279,259	7.474.183,604	676,841	676,899	0,058
4349	289.179,291	7.474.147,252	676,747	676,708	-0,039
4357	288.879,385	7.474.428,981	641,931	641,964	0,033
4359	288.897,561	7.474.566,438	632,590	632,696	0,106
4372	288.885,065	7.474.610,742	627,731	627,654	-0,077
4377	289.019,114	7.474.099,540	667,501	667,497	-0,004
4381	288.891,881	7.474.306,293	650,298	650,363	0,065
4411	289.313,339	7.473.830,307	688,445	688,678	0,233
4424	288.924,826	7.473.976,851	649,512	649,398	-0,114
4425	288.885,065	7.474.031,380	651,767	651,895	0,128
4483	289.352,468	7.473.092,482	684,924	684,820	-0,104
4502	289.395,127	7.473.012,496	685,328	685,061	-0,267

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
4542	289.095,909	7.472.987,739	659,503	659,449	-0,054
4547	288.960,839	7.472.901,220	651,624	651,707	0,083
4579	289.361,154	7.472.597,478	669,680	669,686	0,006
4588	289.123,029	7.472.761,520	655,321	655,262	-0,059
4595	289.209,548	7.472.882,170	666,207	666,126	-0,081
4601	289.220,263	7.472.711,911	664,976	664,964	-0,012
4602	289.168,669	7.472.729,770	655,626	655,793	0,167
4624	289.354,540	7.472.803,192	676,911	676,905	-0,006
4626	288.970,893	7.472.855,447	646,452	646,378	-0,074
4647	289.406,492	7.472.405,757	676,495	676,548	0,053
4660	289.324,774	7.472.508,842	659,103	659,077	-0,026
4786	288.477,685	7.476.696,381	604,577	604,680	0,103
4809	288.673,421	7.476.824,035	604,904	605,075	0,171
4821	288.611,722	7.476.892,117	604,837	604,840	0,003
4827	288.524,492	7.476.894,245	604,568	604,557	-0,011
4839	288.386,200	7.476.607,023	610,733	609,330	-1,403
4840	288.390,455	7.476.679,360	609,536	609,576	0,040
4841	288.428,751	7.476.692,126	608,366	608,667	0,301
4883	288.777,672	7.476.872,969	605,061	605,060	-0,001
4884	288.815,036	7.476.872,403	605,100	605,083	-0,017
4893	288.760,651	7.476.632,554	599,600	599,998	0,398
4902	288.822,339	7.476.713,388	596,977	596,975	-0,002
4903	288.773,417	7.476.677,233	597,104	598,999	1,895
4915	288.741,503	7.476.430,435	604,204	604,161	-0,043
4934	288.603,212	7.476.334,695	604,657	604,685	0,028
4945	288.520,588	7.475.977,556	613,013	613,060	0,047
4946	288.477,685	7.476.073,004	606,443	606,389	-0,054
4953	288.692,569	7.476.053,856	621,625	621,452	-0,173
4964	288.743,631	7.476.064,494	619,696	619,574	-0,122
4991	288.403,220	7.476.162,362	595,249	595,256	0,007
5010	288.770,355	7.476.051,640	621,262	621,284	0,022
5034	288.476,138	7.475.425,634	629,800	629,985	0,185
5037	288.630,126	7.475.271,647	643,600	643,836	0,236
5050	288.596,788	7.475.624,072	633,500	633,677	0,177
5054	288.715,851	7.475.311,334	653,300	652,493	-0,807
5059	288.663,463	7.475.119,246	645,505	645,496	-0,009
5060	288.706,326	7.475.117,659	648,561	648,577	0,016
5062	288.787,289	7.475.152,584	653,402	653,363	-0,039
5078	288.849,849	7.474.631,190	624,108	624,166	0,058
5082	288.345,096	7.474.545,478	602,136	602,116	-0,020
5086	288.377,066	7.474.585,787	602,757	602,684	-0,073

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
5087	288.420,155	7.474.513,509	606,804	606,713	-0,091
5088	288.618,921	7.474.381,462	625,185	625,277	0,092
5089	288.636,991	7.474.420,381	625,122	625,142	0,020
5090	288.546,642	7.474.421,771	624,615	624,281	-0,334
5097	288.427,105	7.474.035,359	630,586	630,625	0,039
5105	288.759,308	7.474.043,698	639,173	639,104	-0,069
5106	288.861,209	7.474.107,492	652,668	652,541	-0,127
5110	288.773,208	7.474.115,977	643,176	643,312	0,136
5117	288.827,129	7.474.142,708	648,639	648,682	0,043
5122	288.860,073	7.474.335,829	645,739	645,726	-0,013
5127	288.662,010	7.473.673,966	661,603	661,831	0,228
5131	288.593,901	7.473.844,932	644,506	644,626	0,120
5133	288.436,835	7.473.932,501	636,155	636,318	0,163
5134	288.441,004	7.473.814,353	643,379	643,406	0,027
5149	288.759,308	7.474.027,019	637,689	637,988	0,299
5150	288.764,868	7.473.996,439	637,407	637,462	0,055
5151	288.784,328	7.473.946,400	637,814	637,745	-0,069
5168	288.767,648	7.473.678,136	655,940	656,123	0,183
5169	288.775,988	7.473.721,225	653,456	653,503	0,047
5170	288.759,308	7.473.767,094	651,151	651,320	0,169
5177	288.781,548	7.473.311,183	683,772	683,751	-0,021
5182	288.591,121	7.473.443,230	675,399	675,342	-0,057
5183	288.550,812	7.473.440,450	672,582	672,382	-0,200
5184	288.737,069	7.472.985,930	670,601	670,628	0,027
5185	288.696,759	7.472.924,771	670,243	670,207	-0,036
5186	288.643,940	7.472.883,072	670,433	670,524	0,091
5211	288.437,644	7.472.512,260	632,450	632,394	-0,056
5215	288.390,965	7.472.368,782	628,566	628,470	-0,096
5229	288.492,433	7.472.318,743	631,490	631,546	0,056
5234	288.681,470	7.472.320,133	632,527	632,541	0,014
5351	288.307,480	7.476.972,965	602,494	602,433	-0,061
5357	288.396,838	7.476.951,689	603,216	603,239	0,023
5426	288.069,882	7.473.869,952	627,729	627,690	-0,039
5454	287.996,213	7.473.291,723	631,542	631,426	-0,116
5456	288.112,971	7.473.441,840	638,619	638,677	0,058
5471	288.324,247	7.472.445,231	623,421	623,633	0,212
5473	288.111,581	7.472.459,130	618,214	618,254	0,040
5516	288.336,757	7.472.213,105	641,417	641,399	-0,018
5522	288.295,057	7.472.283,994	630,224	630,264	0,040
5569	287.843,317	7.472.249,244	627,605	627,636	0,031
5579	288.209,612	7.477.013,388	600,830	600,883	0,053

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
5645	288.292,587	7.476.475,114	603,100	603,083	-0,017
5685	287.973,452	7.476.789,994	608,399	608,386	-0,013
5694	288.177,687	7.476.246,373	591,326	591,391	0,065
5697	288.073,970	7.476.187,107	591,295	591,368	0,073
5698	288.226,632	7.476.253,847	591,200	591,187	-0,013
5710	287.954,304	7.476.296,399	599,752	599,724	-0,028
5713	288.105,361	7.476.296,399	594,695	594,709	0,014
5724	287.888,762	7.476.013,540	586,609	586,540	-0,069
5728	288.289,871	7.475.890,773	602,123	602,191	0,068
5760	288.193,562	7.475.397,059	603,188	603,079	-0,109
5772	287.827,643	7.475.501,834	584,801	584,716	-0,085
5794	288.217,219	7.474.624,707	598,268	598,286	0,018
5798	288.017,350	7.474.695,383	607,913	607,978	0,065
5800	288.182,470	7.474.621,927	598,007	597,950	-0,057
5808	288.312,625	7.474.898,583	610,759	610,552	-0,207
5809	288.288,813	7.474.974,783	611,233	611,193	-0,040
5812	288.066,562	7.474.985,896	593,799	593,762	-0,037
5820	287.826,849	7.474.857,308	603,675	603,707	0,032
5822	288.014,175	7.475.152,584	588,529	588,467	-0,062
5828	288.061,542	7.474.370,342	616,436	616,467	0,031
5842	288.246,408	7.474.056,208	626,344	626,348	0,004
5850	288.290,887	7.474.482,930	602,449	602,380	-0,069
5851	288.265,868	7.474.499,609	602,552	602,682	0,130
5852	288.299,227	7.474.534,358	601,664	601,592	-0,072
5855	287.826,637	7.474.239,684	616,747	616,769	0,022
5866	287.928,105	7.474.293,893	616,751	616,706	-0,045
5870	287.928,105	7.474.400,921	614,514	614,535	0,021
5875	287.918,375	7.474.591,347	611,922	612,001	0,079
5877	288.199,149	7.474.033,969	626,494	626,450	-0,044
5915	287.533,046	7.477.079,343	614,885	614,817	-0,068
5922	287.228,804	7.477.124,022	605,170	605,032	-0,138
5949	287.439,433	7.476.641,064	613,228	613,162	-0,066
5952	287.284,120	7.476.487,879	606,500	606,255	-0,245
5963	287.445,815	7.476.809,142	616,132	616,072	-0,060
5980	287.692,970	7.475.805,048	580,798	580,704	-0,094
5983	287.356,458	7.476.315,547	607,214	607,164	-0,050
6000	287.484,478	7.475.854,789	579,876	579,810	-0,066
6022	287.295,829	7.475.612,960	584,267	584,292	0,025
6036	287.529,192	7.475.574,860	582,479	582,484	0,005
6038	287.473,630	7.475.576,447	583,695	583,866	0,171
6043	287.568,880	7.475.393,884	592,958	593,000	0,042

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
6054	287.413,305	7.475.571,685	584,912	584,824	-0,088
6059	287.270,429	7.475.258,946	594,226	594,167	-0,059
6064	287.275,192	7.475.214,496	595,062	595,057	-0,005
6082	287.347,423	7.474.935,096	598,683	598,619	-0,064
6086	287.406,161	7.474.947,796	596,245	596,241	-0,004
6102	287.671,274	7.474.879,533	600,543	600,568	0,025
6103	287.575,230	7.474.865,246	596,709	596,736	0,027
6107	287.578,405	7.474.727,133	601,493	601,497	0,004
6109	287.611,742	7.474.701,733	601,801	601,906	0,105
6124	287.291,498	7.474.530,189	618,257	618,269	0,012
6130	287.672,350	7.474.079,838	618,817	618,864	0,047
6131	287.741,849	7.474.072,888	619,329	619,372	0,043
6135	287.558,372	7.474.463,470	612,945	612,982	0,037
6138	287.562,542	7.474.343,932	615,492	615,537	0,045
6151	287.675,130	7.474.569,108	607,709	607,664	-0,045
6153	287.662,620	7.474.563,548	607,801	607,837	0,036
6154	287.734,899	7.474.500,999	609,760	609,880	0,120
6157	287.376,286	7.473.158,286	620,516	620,500	-0,016
6161	287.520,843	7.473.170,796	612,486	612,534	0,048
6170	287.451,817	7.472.186,040	647,807	647,852	0,045
6208	287.732,119	7.472.185,306	629,004	628,848	-0,156
6216	286.906,097	7.475.833,623	584,159	584,323	0,164
6222	286.701,309	7.476.120,961	573,067	573,138	0,071
6228	286.815,610	7.476.014,598	575,930	575,924	-0,006
6231	286.888,635	7.475.932,048	580,032	579,988	-0,044
6238	286.712,422	7.476.260,661	571,947	571,941	-0,006
6240	286.842,597	7.476.084,448	575,045	575,059	0,014
6244	286.977,535	7.476.011,423	576,311	576,455	0,144
6298	286.809,177	7.474.608,027	602,595	602,473	-0,122
6299	286.749,409	7.474.587,177	599,732	599,673	-0,059
6300	286.733,853	7.474.689,033	597,430	597,242	-0,188
6302	286.851,328	7.474.689,033	604,350	604,300	-0,050
6322	287.009,333	7.474.628,877	612,396	612,412	0,016
6323	287.228,949	7.474.608,027	616,685	616,705	0,020
6339	287.192,810	7.474.070,108	599,307	599,319	0,012
6351	286.749,409	7.474.267,484	594,243	594,208	-0,035
6359	286.860,606	7.474.352,272	593,265	593,166	-0,099
6364	286.760,528	7.474.559,378	599,788	599,766	-0,022
6370	287.173,350	7.474.339,762	609,297	609,235	-0,062
6376	287.089,952	7.474.197,985	597,084	597,103	0,019
6390	287.059,372	7.473.843,542	610,410	610,585	0,175

ID	E(m)	N(m)	H <sub>Pto_Cotado</sub> (m)	H <sub>TIN</sub> (m)	ΔH(m)
6394	287.021,843	7.473.996,439	606,404	606,356	-0,048
6395	286.985,704	7.473.889,411	611,312	611,308	-0,004
6397	286.910,645	7.473.837,982	613,516	613,533	0,017
6411	287.098,291	7.473.573,888	616,543	616,610	0,067
6430	286.874,506	7.473.255,584	624,131	624,127	-0,004
6437	287.240,069	7.473.016,509	631,477	631,519	0,042
6439	287.087,172	7.472.309,013	661,594	661,602	0,008
6441	286.967,634	7.472.391,022	658,521	658,454	-0,067
6443	286.900,915	7.472.734,345	646,144	646,226	0,082
6473	286.513,941	7.477.141,042	594,515	594,522	0,007
6494	286.590,534	7.477.107,001	587,872	587,971	0,099
6507	286.664,999	7.476.924,031	588,718	589,010	0,292
6517	286.807,546	7.476.828,290	570,011	570,044	0,033
6548	287.077,746	7.476.824,035	588,026	588,145	0,119
6550	286.926,689	7.476.824,035	573,895	573,688	-0,207
6574	286.613,191	7.473.871,342	610,771	610,801	0,030
6575	286.628,481	7.473.821,303	611,322	611,400	0,078
6576	286.646,551	7.473.842,152	610,085	610,018	-0,067
6591	286.628,481	7.473.975,590	608,328	608,346	0,018
6592	286.652,110	7.473.889,411	609,360	609,405	0,045
6594	286.652,110	7.473.815,743	610,596	610,589	-0,007
6596	286.640,991	7.473.623,927	613,532	613,474	-0,058
6600	286.584,002	7.473.669,796	611,750	611,783	0,033
6607	286.595,122	7.473.402,921	616,100	616,113	0,013
6615	286.617,361	7.473.168,016	619,846	619,895	0,049
6647	286.558,982	7.472.960,910	629,133	629,044	-0,089
6653	286.610,411	7.472.486,930	637,353	637,338	-0,015
6753	286.513,941	7.476.664,467	611,378	611,437	0,059
6755	286.605,427	7.476.779,356	596,438	596,279	-0,159
6756	286.547,982	7.476.777,228	601,919	602,244	0,325
6757	286.569,258	7.476.724,039	601,492	601,360	-0,132
6779	286.674,322	7.475.828,860	572,721	572,620	-0,101
6792	286.607,647	7.475.990,785	578,700	578,657	-0,043
6793	286.585,422	7.475.878,073	580,273	580,162	-0,111
6795	286.610,028	7.475.751,072	576,048	576,274	0,226
6797	286.671,147	7.475.971,735	573,719	573,715	-0,004
6798	286.666,384	7.476.133,661	573,902	574,086	0,184
6805	286.652,891	7.475.498,659	577,500	578,092	0,592
6821	286.619,553	7.475.201,796	586,137	586,027	-0,110
6824	286.513,984	7.475.611,372	585,457	585,496	0,039
6825	286.575,103	7.475.592,322	579,690	579,794	0,104

<b>ID</b>	<b>E(m)</b>	<b>N(m)</b>	<b>H<sub>Pto_Cotado</sub>(m)</b>	<b>H<sub>TIN</sub>(m)</b>	<b>ΔH(m)</b>
6828	286.544,147	7.475.444,684	582,965	583,066	0,101
6829	286.621,140	7.475.444,684	579,278	579,310	0,032
6835	286.537,003	7.475.238,309	581,600	581,292	-0,308
6842	286.622,921	7.474.638,606	589,486	589,444	-0,042
6844	286.614,790	7.474.700,145	589,912	590,013	0,101
6848	286.629,078	7.474.946,208	585,481	585,455	-0,026
6878	286.567,322	7.474.045,088	607,583	607,609	0,026
6888	286.703,539	7.474.032,579	607,573	607,649	0,076
6903	286.699,370	7.474.277,214	594,554	594,579	0,025
6910	286.532,573	7.474.378,682	595,539	595,548	0,009
6912	286.639,601	7.474.478,760	591,579	591,436	-0,143
6915	286.564,542	7.474.388,411	593,435	593,490	0,055

Fonte: Elaborado pela autora.

### APÊNDICE C – Análise dos pontos excluídos no método I

Nesta seção foram analisados os pontos excluídos no método I (seção 6.3). O ponto cotado, cujo número identificador é 2757, é mostrado na figura 1 como um triângulo na cor vermelha, e os pontos LiDAR são mostrados como círculos na cor amarela. Percebe-se que no entorno do ponto cotado há baixa densidade de pontos LiDAR, devido à varredura não ter acontecido de forma regular. Essa baixa densidade torna a interpolação menos confiável e, de fato, constatou-se uma diferença altimétrica de 0,548 m entre o ponto cotado e a TIN, além de ser área de vegetação, condição que diminui a precisão. Sempre que possível, os pontos de controle devem ser colhidos em solo nu.

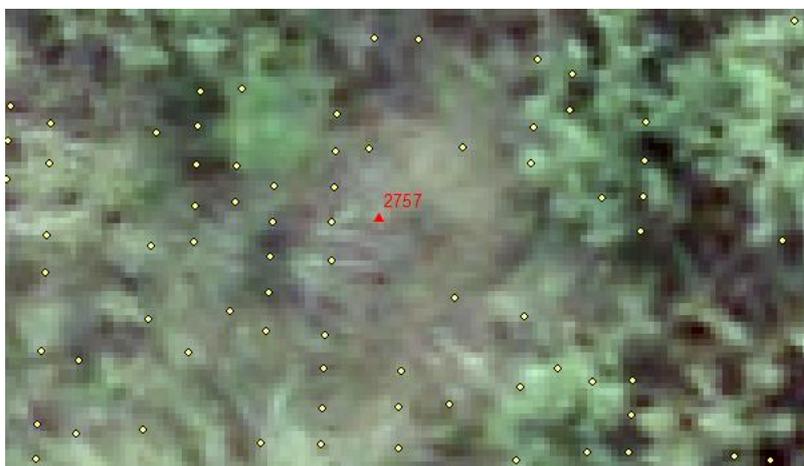


Figura 1 - Localização do ponto cotado de identificação 2757. Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto cotado de número identificador 3292, figura 2, localizado numa via pavimentada possui uma densidade regular de pontos LiDAR em seu entorno. No entanto, a diferença altimétrica entre o ponto cotado e a TIN foi de 0,529 m.

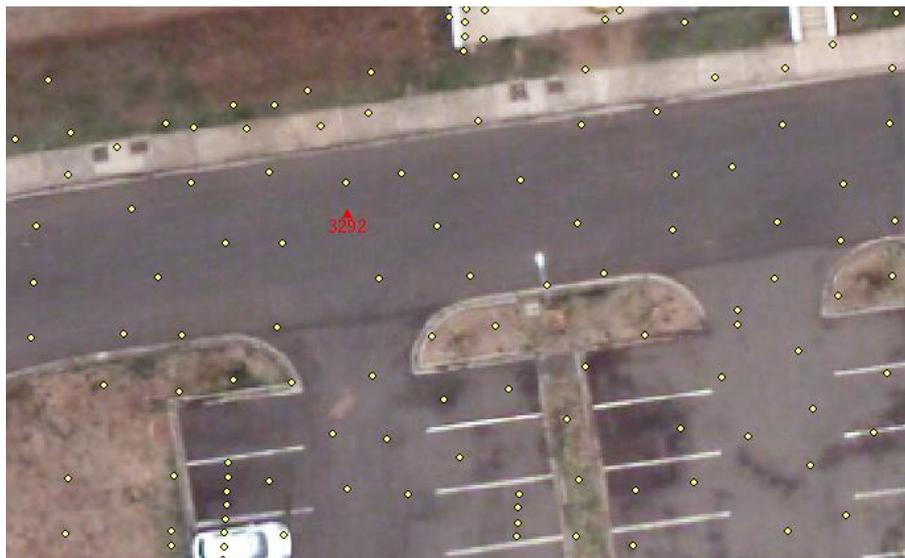


Figura 2 - Localização do ponto cotado de identificação 3292. Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os valores altimétricos no entorno do ponto cotado 3292, figura 3, verifica-se que este é o que tem o menor valor de altimetria. Poderia ser um buraco na pavimentação, contudo, a análise visual não possibilita maiores conclusões. De qualquer forma, não se encontrou a causa da diferença e optou-se por eliminá-lo, por discrepar muito do seu entorno, que é uma região plana.



Figura 3 - Valores altimétricos no entorno do ponto cotado de identificação 3292. Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto cotado de número identificador 4839, figura 4, localizado numa via pavimentada possui baixíssima densidade de pontos LiDAR em seu entorno. A diferença altimétrica entre o ponto cotado e a TIN foi de -1,403 m.

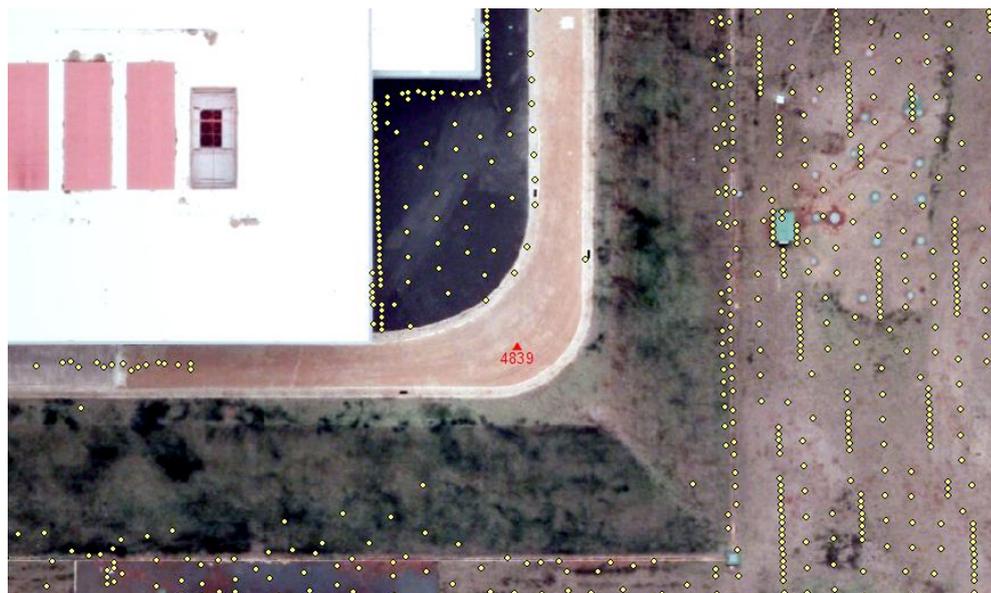


Figura 4 - Localização do ponto cotado de identificação 4839. Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto cotado de número identificador 4903, figura 5, possui densidade regular de pontos LiDAR no seu entorno, mas por estar localizado em área de mineração, que se modifica dinamicamente, houve uma diferença altimétrica entre o ponto cotado e a TIN de 1,895 m, que pode ser atribuída à escavação ou movimento de terra. Por segurança o ponto foi excluído.

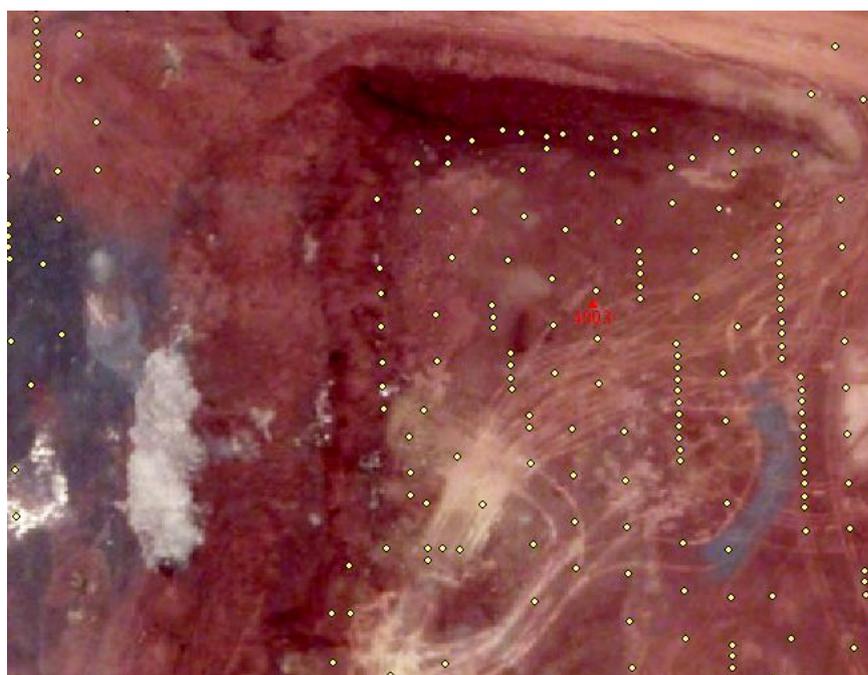


Figura 5 - Localização do ponto cotado de identificação 4903. Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto cotado de número identificador 5054, figura 6, também possui baixíssima densidade de pontos LiDAR no seu entorno. A diferença altimétrica entre o ponto cotado e a TIN foi de -0,807 m.

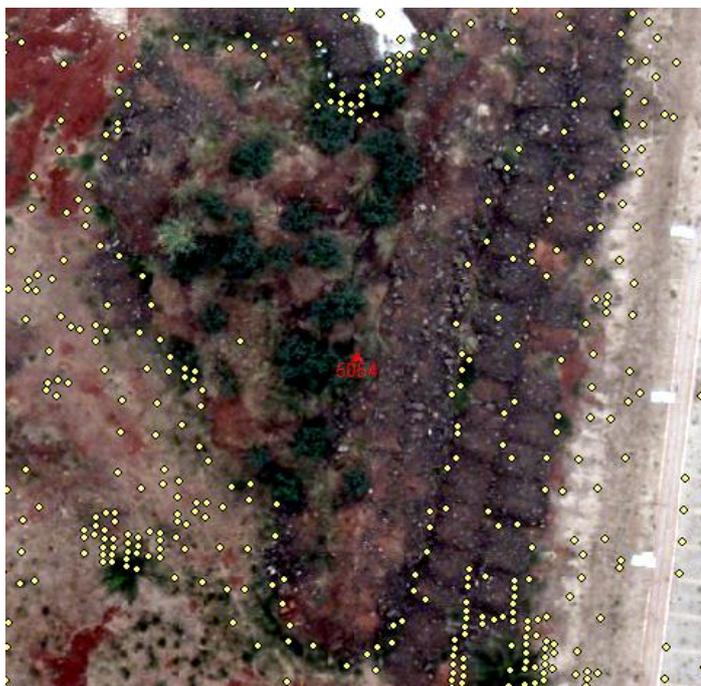


Figura 6 - Localização do ponto cotado de identificação 5054. Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto cotado de número identificador 6805, figura 7, possui baixa densidade de pontos LiDAR no seu entorno, comparado com o padrão de pontos (amarelos) dessa região. A diferença altimétrica entre o ponto cotado e a TIN foi de 0,592 m.

É preciso ter em conta que outros experimentos mostram a ocorrência de certa porcentagem de pontos com erros fora do intervalo esperado (outliers), por causas as mais diversas (bando de pombas ou urubus sobrevoando a região, por exemplo) e até ignoradas (BLITZKOW, MATOS e CINTRA, 2009).



Figura 7 - Localização do ponto cotado de identificação 6805. Fonte: Elaborado pela autora.

## APÊNDICE D – Proposta de controle de qualidade altimétrico para dados LiDAR

Nesta seção pretende-se fazer uma contribuição para a norma brasileira de controle de qualidade cartográfico, especificamente, para dados altimétricos LiDAR, à luz dos estudos, testes e propostas apresentados ao longo do trabalho, mormente no capítulo 6.

Para se obter a acurácia de pontos LiDAR é conveniente aplicar a metodologia do NDEP (2004), também adotada pela ASPRS (2014).

Nesta metodologia é avaliado dois tipos de terreno: a acurácia altimétrica de terrenos sem vegetação (NVA – Non-vegetated Vertical Accuracy), e a acurácia altimétrica de terrenos com vegetação (VVA – Vegetated Vertical Accuracy). No Brasil, pode-se acrescentar regiões de favela e vale analisar se há alterações em função da diferença de vegetação.

A acurácia altimétrica de terrenos sem vegetação (NVA) é calculada ao nível de confiança de 95%, por meio do cálculo do RMSE (*Root Mean Square Error*). A acurácia altimétrica de um conjunto de dados (que pode ser uma nuvem de pontos, uma TIN ou um MDE) deve ser determinada apenas com o auxílio de pontos de controle situados em terreno aberto, em que há uma alta probabilidade de o sensor LiDAR ter detectado a superfície do solo.

Já a acurácia altimétrica de terrenos com vegetação (VVA) é calculada usando o percentil 95, uma função estatística, em que 95% dos erros têm valores absolutos iguais ou inferiores a um valor especificado.

Os pontos de controle devem ser bem distribuídos por toda a região em que se situa o conjunto de dados. Quando houver áreas de maior interesse, os pontos de controle devem ser distribuídos mais densamente nas proximidades das feições de maior importância e mais escassamente distribuídos em áreas que são de pouco ou nenhum interesse.

Uma vez que os pontos de controle coletados e verificados quanto a erros grosseiros, os valores altimétricos correspondentes a cada um deles, ou seja, os pontos de amostra, devem ser extraídos de cada conjunto de dados a ser testado (nuvem de pontos, TIN ou MDE).

O tamanho mínimo da amostra recomendado por Merchant (1982) é de 20 pontos. O método do NDEP (2004) requer um mínimo de 30 pontos de amostra em

cada tipo de cobertura de solo. Já Ariza-López (2008), mostra que seria necessário o uso de 100 pontos de amostra para atingir um nível de confiança de 95%. Há também a possibilidade de definir a quantidade de pontos de verificação pela área de trabalho, como faz a ASPRS (2014).

O erro para cada ponto da amostra é calculado subtraindo-se da cota do ponto interpolado o valor altimétrico do ponto de controle, sempre supondo uma mesma posição (planimétrica). Assim, se a diferença (ou erro) for um número positivo, a cota avaliada do conjunto de dados é superior ao terreno real (ponto de controle), e se a diferença for um número negativo, a cota avaliada do conjunto de dados é inferior ao terreno.

Para o cálculo do erro altimétrico, usa-se a fórmula (1):

$$\Delta H_i = (H_i - H_{ci}) \quad (1)$$

Onde:

$\Delta H_i$  é o erro altimétrico no ponto  $i$

$H_i$  é a cota do ponto  $i$  no conjunto de dados a ser testado;

$H_{ci}$  é a cota do ponto  $i$ , de controle, obtido de uma fonte independente de acurácia maior;

$i$  é um inteiro de 1 a  $n$ ;  $n$  é o número de pontos a serem avaliados.

1º Caso – Cálculo da acurácia altimétrica de terrenos sem vegetação (NVA):

Para o teste de acurácia altimétrica fundamental, utilizando pontos de controle apenas em terreno aberto, usam-se as fórmulas (2) e (3):

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (\Delta H_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{Acurácia}_H = 1,96 \times RMSE_H \quad (3)$$

Onde:

$RMSE_H$  é o erro médio quadrático altimétrico;

$\text{Acurácia}_H$  é a acurácia altimétrica ao nível de confiança de 95% (valor que está implícito no coeficiente 1,96);

$i$  é um inteiro de 1 a  $n$ ;  $n$  é o número de pontos a serem avaliados.

2º Caso – Cálculo da acurácia altimétrica de terrenos com vegetação (VVA):

É empregada a função estatística percentil 95 para testar a acurácia altimétrica de terrenos com vegetação.

Para os casos 1 e 2:

Recomenda-se realizar uma análise estatística a fim de conhecer a média, o desvio padrão, o erro padrão, a assimetria e a curtose da distribuição dos erros altimétricos (discrepâncias em  $\Delta H$ ).

O valor do desvio padrão pode ser utilizado como RMSE desde que os dados amostrais estejam livres de tendência (DEAKIN; KILDEA, 1999, MONICO et al., 2009). Para verificar a existência de tendência pode-se aplicar o teste estatístico com a distribuição *t Student* ao conjunto de dados como recomenda Merchant (1982).

Para verificar o enquadramento nas classes do PEC-PCD, pode-se aplicar o teste Qui-quadrado.

Se o teste não atender à acurácia requerida, isso indica que há um problema com a fonte, ou com o sistema de coleta, ou com o sistema de processamento ou então a acurácia alcançável pelo sistema de produção do mapa está superestimada. Se um problema sistemático puder ser identificado, ele deve ser corrigido, quando possível, e os dados corrigidos (eliminando a tendência) devem ser retestados.

**APÊNDICE E – Tabelas dos valores de  $\Delta H$  entre a TIN e as curvas de nível testadas (Coordenadas UTM, Fuso 23S)**

**Tabela E.1 - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 570 m.**

<b>ID</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>HTIN(m)</b>	<b><math>\Delta</math>HTIN (m)</b>
1	286.719,482	7.477.106,183	570,574	0,574
2	286.729,245	7.477.101,050	569,856	-0,144
3	286.732,036	7.477.095,533	569,904	-0,096
4	286.742,739	7.477.079,658	569,929	-0,071
5	286.744,432	7.477.068,281	570,201	0,201
6	286.749,505	7.477.055,478	569,856	-0,144
7	286.743,602	7.477.042,566	570,361	0,361
8	286.747,994	7.477.037,155	569,973	-0,027
9	286.751,513	7.477.029,443	569,977	-0,023
10	286.757,313	7.477.011,188	569,784	-0,216
11	286.772,633	7.476.969,939	569,740	-0,260
12	286.785,333	7.476.932,990	570,296	0,296
13	286.794,818	7.476.929,418	569,616	-0,384
14	286.788,508	7.476.919,893	570,060	0,060
15	286.790,611	7.476.915,964	569,885	-0,115
16	286.788,944	7.476.897,866	570,164	0,164
17	286.793,905	7.476.881,872	569,832	-0,168
18	286.783,945	7.476.798,249	570,163	0,163
19	286.784,964	7.476.779,689	569,979	-0,021
20	286.786,892	7.476.757,345	569,788	-0,212
21	286.784,627	7.476.744,857	569,501	-0,499
22	286.780,351	7.476.741,089	570,161	0,161
23	286.782,569	7.476.736,655	569,725	-0,275
24	286.775,457	7.476.734,375	570,093	0,093
25	286.767,559	7.476.729,636	570,148	0,148
26	286.753,887	7.476.721,892	570,112	0,112
27	286.749,324	7.476.719,683	569,962	-0,038
28	286.744,416	7.476.718,360	570,049	0,049
29	286.706,851	7.476.704,296	569,893	-0,107
30	286.702,030	7.476.703,947	570,085	0,085
31	286.697,380	7.476.701,117	569,856	-0,144
32	286.689,093	7.476.699,038	570,210	0,210
33	286.636,465	7.476.555,488	570,369	0,369
34	286.630,043	7.476.530,125	569,909	-0,091
35	286.628,256	7.476.525,082	570,081	0,081
36	286.626,082	7.476.511,519	569,876	-0,124

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
37	286.593,780	7.476.455,785	570,070	0,070
38	286.599,394	7.476.455,849	570,014	0,014
39	286.717,980	7.477.121,779	570,530	0,530
40	286.657,459	7.476.624,784	569,035	-0,965
		Média		-0,010
		Desvio padrão		0,273

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.2** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 580 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	286.625,680	7.477.192,599	580,391	0,391
2	286.624,311	7.477.178,427	582,013	2,013
3	286.634,888	7.477.165,449	579,897	-0,103
4	286.639,444	7.477.157,179	581,327	1,327
5	286.641,492	7.477.149,289	579,830	-0,170
6	286.638,317	7.477.143,494	580,286	0,286
7	286.639,777	7.477.136,970	579,928	-0,072
8	286.645,302	7.477.123,095	579,816	-0,184
9	286.649,890	7.477.109,363	579,926	-0,074
10	286.655,557	7.477.084,042	580,477	0,477
11	286.659,034	7.477.072,771	582,161	2,161
12	286.669,098	7.477.059,611	579,912	-0,088
13	286.669,162	7.477.056,467	580,251	0,251
14	286.677,777	7.477.048,263	579,879	-0,121
15	286.677,419	7.477.045,141	580,180	0,180
16	286.685,278	7.477.020,852	580,837	0,837
17	286.704,010	7.477.006,416	579,745	-0,255
18	286.701,735	7.477.001,516	580,046	0,046
19	286.706,531	7.476.994,123	579,660	-0,340
20	286.713,214	7.476.980,058	580,045	0,045
21	286.716,247	7.476.975,343	579,577	-0,423
22	286.717,723	7.476.962,183	580,064	0,064
23	286.726,899	7.476.957,230	579,870	-0,130
24	286.729,915	7.476.946,578	580,297	0,297
25	286.738,599	7.476.932,941	579,852	-0,148
26	286.739,956	7.476.926,597	580,096	0,096
27	286.742,845	7.476.917,737	580,170	0,170
28	286.749,444	7.476.895,593	579,704	-0,296
29	286.747,737	7.476.883,846	580,307	0,307

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
30	286.751,865	7.476.881,319	579,795	-0,205
31	286.752,677	7.476.876,421	580,006	0,006
32	286.752,503	7.476.872,818	579,950	-0,050
33	286.745,488	7.476.833,450	579,875	-0,125
34	286.742,409	7.476.827,465	580,124	0,124
35	286.729,913	7.476.789,257	580,299	0,299
36	286.722,008	7.476.771,927	579,554	-0,446
37	286.636,144	7.476.686,167	579,730	-0,270
38	286.630,994	7.476.681,247	580,084	0,084
39	286.529,060	7.476.498,575	579,882	-0,118
40	286.519,170	7.476.486,677	580,171	0,171
		Média		0,150
		Desvio padrão		0,558

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.3** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 590 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	286.540,167	7.477.193,632	589,790	-0,210
2	286.541,357	7.477.183,044	590,134	0,134
3	286.553,534	7.477.175,773	589,598	-0,402
4	286.550,453	7.477.148,308	591,649	1,649
5	286.566,497	7.477.138,153	589,662	-0,338
6	286.566,069	7.477.122,103	589,497	-0,503
7	286.564,814	7.477.111,086	590,627	0,627
8	286.568,894	7.477.094,925	589,975	-0,025
9	286.580,816	7.477.088,083	589,853	-0,147
10	286.591,590	7.477.082,113	590,080	0,080
11	286.587,788	7.477.052,887	589,423	-0,577
12	286.591,502	7.477.047,944	590,428	0,428
13	286.596,889	7.477.048,220	589,698	-0,302
14	286.608,565	7.477.030,836	589,591	-0,409
15	286.614,542	7.477.016,500	590,226	0,226
16	286.624,674	7.476.996,748	589,957	-0,043
17	286.626,333	7.476.993,153	590,055	0,055
18	286.627,505	7.476.991,827	589,935	-0,065
19	286.626,650	7.476.989,189	590,291	0,291
20	286.630,959	7.476.979,583	589,881	-0,119
21	286.633,414	7.476.972,942	590,599	0,599
22	286.634,880	7.476.969,826	589,960	-0,040

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
23	286.633,308	7.476.967,878	590,355	0,355
24	286.635,960	7.476.963,936	589,902	-0,098
25	286.638,457	7.476.957,406	589,964	-0,036
26	286.638,943	7.476.954,926	590,062	0,062
27	286.645,938	7.476.940,608	589,929	-0,071
28	286.647,288	7.476.933,639	590,096	0,096
29	286.649,351	7.476.929,988	589,963	-0,037
30	286.653,908	7.476.917,730	590,299	0,299
31	286.662,665	7.476.908,787	589,892	-0,108
32	286.666,081	7.476.904,710	590,011	0,011
33	286.670,899	7.476.905,281	589,812	-0,188
34	286.678,876	7.476.896,994	589,925	-0,075
35	286.681,559	7.476.882,826	589,941	-0,059
36	286.681,936	7.476.880,060	590,006	0,006
37	286.682,107	7.476.874,769	589,970	-0,030
38	286.681,230	7.476.872,837	590,096	0,096
39	286.684,243	7.476.865,545	589,762	-0,238
40	286.679,582	7.476.855,374	590,216	0,216
		Média		0,028
		Desvio padrão		0,372

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.4** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 600 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	287.142,537	7.477.183,597	600,219	0,219
2	287.142,676	7.477.179,380	599,972	-0,028
3	287.146,098	7.477.173,429	600,381	0,381
4	287.151,749	7.477.160,211	600,626	0,626
5	287.152,458	7.477.141,267	599,985	-0,015
6	287.153,887	7.477.130,556	600,191	0,191
7	287.152,638	7.477.125,243	599,941	-0,059
8	287.155,588	7.477.120,329	600,956	0,956
9	287.148,224	7.477.117,613	599,752	-0,248
10	287.150,822	7.477.106,074	599,862	-0,138
11	287.162,281	7.477.101,504	600,067	0,067
12	287.162,341	7.477.098,143	599,941	-0,059
13	287.156,949	7.477.062,639	600,224	0,224
14	287.150,596	7.477.039,193	599,629	-0,371
15	287.145,278	7.477.015,886	600,155	0,155

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
16	287.133,212	7.477.012,944	599,741	-0,259
17	287.143,521	7.476.995,015	600,044	0,044
18	287.151,712	7.476.981,829	599,934	-0,066
19	287.150,238	7.476.974,688	600,028	0,028
20	287.143,642	7.476.973,092	599,816	-0,184
21	287.153,890	7.476.956,344	600,067	0,067
22	287.160,824	7.476.936,299	599,981	-0,019
23	287.164,873	7.476.923,824	600,028	0,028
24	287.165,640	7.476.915,331	599,740	-0,260
25	287.185,433	7.476.912,509	600,371	0,371
26	287.191,218	7.476.892,188	601,327	1,327
27	287.180,986	7.476.880,916	600,158	0,158
28	287.180,550	7.476.877,212	599,923	-0,077
29	287.182,145	7.476.875,795	600,044	0,044
30	287.187,806	7.476.859,831	599,761	-0,239
31	287.201,599	7.476.824,199	600,231	0,231
32	287.206,986	7.476.803,731	599,886	-0,114
33	287.209,346	7.476.801,784	600,027	0,027
34	287.208,849	7.476.791,391	599,817	-0,183
35	287.214,289	7.476.767,091	599,635	-0,365
36	287.226,265	7.476.775,539	600,279	0,279
37	287.230,905	7.476.749,234	599,814	-0,186
38	287.234,578	7.476.747,297	600,101	0,101
39	287.233,046	7.476.743,389	599,809	-0,191
40	287.241,391	7.476.732,235	600,031	0,031
		Média		0,062
		Desvio padrão		0,330

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.5** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 610 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	288.374,570	7.475.864,883	609,908	-0,092
2	288.369,808	7.475.853,615	610,181	0,181
3	288.367,681	7.475.851,357	609,960	-0,040
4	288.365,154	7.475.844,888	610,201	0,201
5	288.361,827	7.475.842,308	609,979	-0,021
6	288.362,204	7.475.837,804	610,292	0,292
7	288.355,139	7.475.833,367	609,877	-0,123
8	288.350,257	7.475.820,500	610,142	0,142

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
9	288.337,091	7.475.808,485	609,636	-0,364
10	288.332,395	7.475.790,497	610,206	0,206
11	288.326,666	7.475.783,353	609,990	-0,010
12	288.319,575	7.475.773,272	610,045	0,045
13	288.316,072	7.475.771,121	609,885	-0,115
14	288.306,378	7.475.752,547	609,970	-0,030
15	288.304,416	7.475.747,554	610,004	0,004
16	288.302,699	7.475.745,607	609,978	-0,022
17	288.299,324	7.475.741,921	610,014	0,014
18	288.296,805	7.475.740,656	609,984	-0,016
19	288.294,433	7.475.736,491	610,113	0,113
20	288.287,584	7.475.726,871	609,994	-0,006
21	288.286,192	7.475.723,987	610,020	0,020
22	288.281,188	7.475.719,202	609,906	-0,094
23	288.272,942	7.475.704,165	610,093	0,093
24	288.255,564	7.475.691,899	609,824	-0,176
25	288.256,358	7.475.682,088	610,081	0,081
26	288.251,998	7.475.678,307	609,894	-0,106
27	288.249,981	7.475.665,195	610,033	0,033
28	288.245,886	7.475.661,623	609,870	-0,130
29	288.244,855	7.475.651,725	610,314	0,314
30	288.231,441	7.475.634,228	609,999	-0,001
31	288.230,547	7.475.626,769	610,246	0,246
32	288.223,350	7.475.620,578	609,950	-0,050
33	288.217,171	7.475.614,099	609,935	-0,065
34	288.218,735	7.475.606,559	610,176	0,176
35	288.205,836	7.475.599,841	609,712	-0,288
36	288.218,328	7.475.567,815	610,235	0,235
37	288.205,615	7.475.556,652	609,859	-0,141
38	288.206,281	7.475.549,648	610,008	0,008
39	288.207,022	7.475.547,643	609,997	-0,003
40	288.217,122	7.475.527,710	610,287	0,287
		Média		0,020
		Desvio padrão		0,153

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.6** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 620 m.

<b>ID</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>HTIN(m)</b>	<b>ΔHTIN (m)</b>
1	288.414,948	7.475.663,924	619,714	-0,286
2	288.394,078	7.475.632,745	620,086	0,086
3	288.389,188	7.475.634,058	619,711	-0,289
4	288.370,841	7.475.570,190	620,143	0,143
5	288.364,359	7.475.551,405	620,109	0,109
6	288.361,482	7.475.543,335	620,154	0,154
7	288.354,933	7.475.512,445	619,898	-0,102
8	288.361,846	7.475.506,459	620,143	0,143
9	288.345,474	7.475.482,977	619,903	-0,097
10	288.348,420	7.475.464,913	620,164	0,164
11	288.349,676	7.475.457,214	619,995	-0,005
12	288.349,816	7.475.429,810	620,473	0,473
13	288.346,103	7.475.415,101	620,080	0,080
14	288.341,236	7.475.410,151	620,108	0,108
15	288.335,489	7.475.401,060	619,939	-0,061
16	288.342,506	7.475.392,120	620,367	0,367
17	288.336,707	7.475.380,573	620,021	0,021
18	288.336,293	7.475.366,750	619,896	-0,104
19	288.337,817	7.475.356,145	620,069	0,069
20	288.334,293	7.475.349,541	619,929	-0,071
21	288.335,483	7.475.345,080	620,035	0,035
22	288.334,896	7.475.338,238	619,956	-0,044
23	288.337,611	7.475.333,190	620,050	0,050
24	288.354,687	7.475.303,346	620,276	0,276
25	288.339,987	7.475.284,521	619,798	-0,202
26	288.346,485	7.475.271,588	620,039	0,039
27	288.361,813	7.475.177,917	620,304	0,304
28	288.374,240	7.475.153,491	620,120	0,120
29	288.375,350	7.475.141,829	619,973	-0,027
30	288.375,814	7.475.137,407	620,029	0,029
31	288.375,064	7.475.134,367	619,963	-0,037
32	288.376,120	7.475.132,371	620,057	0,057
33	288.369,488	7.475.127,509	620,052	0,052
34	288.365,366	7.475.125,842	619,976	-0,024
35	288.364,777	7.475.125,346	620,005	0,005
36	288.361,828	7.475.122,949	619,831	-0,169
37	288.364,208	7.475.119,621	620,201	0,201
38	288.365,312	7.475.105,238	619,863	-0,137
39	288.368,158	7.475.099,539	620,018	0,018

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
40	288.367,536	7.475.096,434	619,872	-0,128
		Média		0,033
		Desvio padrão		0,160

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.7** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 630 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	288.483,716	7.475.436,310	630,435	0,435
2	288.465,211	7.475.408,732	629,607	-0,393
3	288.463,888	7.475.379,218	630,012	0,012
4	288.461,589	7.475.366,648	629,869	-0,131
5	288.463,381	7.475.362,076	630,030	0,030
6	288.463,178	7.475.347,693	629,914	-0,086
7	288.463,702	7.475.339,737	629,916	-0,084
8	288.464,472	7.475.320,044	629,972	-0,028
9	288.464,980	7.475.317,612	630,005	0,005
10	288.464,586	7.475.310,200	629,944	-0,056
11	288.464,164	7.475.301,687	630,013	0,013
12	288.461,306	7.475.301,139	629,918	-0,082
13	288.452,657	7.475.227,139	631,000	1,000
14	288.469,842	7.475.178,244	630,229	0,229
15	288.472,208	7.475.154,468	630,038	0,038
16	288.470,835	7.475.148,330	629,900	-0,100
17	288.472,065	7.475.141,964	630,088	0,088
18	288.471,872	7.475.135,224	630,044	0,044
19	288.470,780	7.475.132,429	629,917	-0,083
20	288.472,881	7.475.129,604	630,062	0,062
21	288.473,567	7.475.125,119	629,916	-0,084
22	288.475,266	7.475.116,864	630,161	0,161
23	288.471,813	7.475.110,615	629,809	-0,191
24	288.466,190	7.475.090,003	629,818	-0,182
25	288.469,246	7.475.083,058	630,031	0,031
26	288.470,906	7.475.077,032	629,958	-0,042
27	288.481,651	7.475.042,751	630,118	0,118
28	288.482,055	7.475.040,377	629,945	-0,055
29	288.484,660	7.475.035,910	630,026	0,026
30	288.486,029	7.475.033,363	629,919	-0,081
31	288.493,040	7.475.027,601	630,211	0,211
32	288.499,618	7.475.016,851	629,961	-0,039

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
33	288.501,749	7.475.014,696	630,182	0,182
34	288.502,285	7.475.012,200	629,985	-0,015
35	288.525,788	7.474.957,630	631,000	1,000
36	288.532,824	7.474.940,870	629,867	-0,133
37	288.540,496	7.474.948,646	630,463	0,463
38	288.552,385	7.474.934,320	629,902	-0,098
39	288.557,306	7.474.930,922	630,123	0,123
40	288.558,645	7.474.915,312	631,551	1,551
Média				0,096
Desvio padrão				0,357

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.8** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 640 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	288.600,058	7.475.485,220	640,128	0,128
2	288.595,957	7.475.470,801	639,724	-0,276
3	288.605,535	7.475.473,526	640,253	0,253
4	288.601,064	7.475.463,868	639,961	-0,039
5	288.598,868	7.475.436,537	640,236	0,236
6	288.594,343	7.475.421,773	640,617	0,617
7	288.587,755	7.475.419,392	639,783	-0,217
8	288.591,988	7.475.364,517	640,376	0,376
9	288.578,997	7.475.335,598	639,754	-0,246
10	288.589,501	7.475.296,069	640,126	0,126
11	288.584,607	7.475.255,853	639,809	-0,191
12	288.583,272	7.475.227,510	640,040	0,040
13	288.582,788	7.475.225,336	639,989	-0,011
14	288.584,026	7.475.212,294	640,433	0,433
15	288.586,312	7.475.184,989	639,974	-0,026
16	288.586,773	7.475.174,067	640,154	0,154
17	288.586,297	7.475.160,938	639,907	-0,093
18	288.589,154	7.475.156,287	640,045	0,045
19	288.586,297	7.475.142,000	639,888	-0,112
20	288.587,855	7.475.137,065	640,020	0,020
21	288.587,573	7.475.129,575	639,895	-0,105
22	288.596,300	7.475.107,975	640,131	0,131
23	288.602,121	7.475.082,300	639,881	-0,119
24	288.607,307	7.475.083,358	640,177	0,177
25	288.610,841	7.475.065,854	639,784	-0,216

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
26	288.628,729	7.475.058,555	641,000	1,000
27	288.627,575	7.475.034,776	639,967	-0,033
28	288.628,773	7.475.031,403	640,071	0,071
29	288.629,146	7.475.027,315	639,889	-0,111
30	288.643,763	7.474.986,101	640,222	0,222
31	288.665,163	7.474.964,045	639,911	-0,089
32	288.672,402	7.474.960,425	640,065	0,065
33	288.673,439	7.474.958,139	639,969	-0,031
34	288.680,847	7.474.954,139	640,358	0,358
35	288.680,953	7.474.943,619	639,922	-0,078
36	288.691,923	7.474.928,686	639,904	-0,096
37	288.701,067	7.474.918,589	640,078	0,078
38	288.702,845	7.474.913,716	639,768	-0,232
39	288.708,306	7.474.913,811	640,166	0,166
40	288.711,973	7.474.900,889	639,779	-0,221
			Média	0,054
			Desvio padrão	0,253

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.9** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 650 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	289.244,434	7.475.286,099	649,929	-0,071
2	289.234,134	7.475.274,631	649,894	-0,106
3	289.233,588	7.475.272,270	650,053	0,053
4	289.231,508	7.475.270,671	649,935	-0,065
5	289.230,878	7.475.268,400	650,086	0,086
6	289.221,705	7.475.258,457	650,169	0,169
7	289.218,747	7.475.258,366	649,920	-0,080
8	289.216,858	7.475.255,781	650,061	0,061
9	289.214,397	7.475.254,571	649,894	-0,106
10	289.206,177	7.475.246,492	650,064	0,064
11	289.199,113	7.475.242,738	649,905	-0,095
12	289.197,262	7.475.240,369	650,027	0,027
13	289.180,850	7.475.230,870	649,831	-0,169
14	289.149,524	7.475.210,576	650,042	0,042
15	289.143,894	7.475.209,290	649,797	-0,203
16	289.114,091	7.475.194,328	650,067	0,067
17	289.107,487	7.475.192,558	649,945	-0,055
18	289.094,430	7.475.183,501	650,058	0,058
19	289.085,992	7.475.178,675	649,912	-0,088

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
20	289.082,198	7.475.174,564	650,011	0,011
21	289.080,365	7.475.173,540	649,939	-0,061
22	289.078,571	7.475.170,643	650,021	0,021
23	289.075,610	7.475.169,254	649,945	-0,055
24	289.072,356	7.475.164,618	650,031	0,031
25	289.069,062	7.475.161,395	649,912	-0,088
26	289.064,688	7.475.153,633	650,042	0,042
27	289.060,561	7.475.150,140	649,852	-0,148
28	289.054,372	7.475.138,869	650,063	0,063
29	289.048,329	7.475.129,153	649,910	-0,090
30	289.048,595	7.475.126,226	650,056	0,056
31	289.047,245	7.475.124,334	649,951	-0,049
32	289.045,135	7.475.116,984	650,169	0,169
33	289.042,103	7.475.109,189	649,940	-0,060
34	289.041,128	7.475.104,057	649,897	-0,103
35	289.040,183	7.475.094,350	650,226	0,226
36	289.037,228	7.475.088,881	649,850	-0,150
37	289.037,217	7.475.079,811	650,055	0,055
38	289.035,464	7.475.075,862	649,967	-0,033
39	289.035,144	7.475.070,151	650,081	0,081
40	289.034,055	7.475.067,890	649,995	-0,005
		Média		-0,012
		Desvio padrão		0,096

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.10** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 660 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	289.179,841	7.474.943,114	659,801	-0,199
2	289.192,330	7.474.944,539	660,240	0,240
3	289.195,977	7.474.929,851	659,835	-0,165
4	289.201,564	7.474.925,295	660,059	0,059
5	289.204,401	7.474.918,603	659,956	-0,044
6	289.213,224	7.474.908,105	660,096	0,096
7	289.221,297	7.474.892,466	659,872	-0,128
8	289.234,645	7.474.888,471	660,312	0,312
9	289.232,502	7.474.876,631	659,932	-0,068
10	289.242,173	7.474.873,800	660,458	0,458
11	289.247,181	7.474.853,196	659,827	-0,173
12	289.259,723	7.474.833,718	660,072	0,072
13	289.262,945	7.474.827,939	659,954	-0,046

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
14	289.282,630	7.474.788,887	660,160	0,160
15	289.283,710	7.474.771,853	659,864	-0,136
16	289.291,266	7.474.764,455	660,106	0,106
17	289.298,251	7.474.751,533	659,961	-0,039
18	289.303,763	7.474.746,598	660,032	0,032
19	289.306,441	7.474.742,609	659,997	-0,003
20	289.313,580	7.474.736,424	660,227	0,227
21	289.312,040	7.474.720,926	659,978	-0,022
22	289.313,109	7.474.719,185	660,008	0,008
23	289.313,760	7.474.716,280	659,989	-0,011
24	289.323,533	7.474.701,593	660,089	0,089
25	289.329,052	7.474.687,476	659,936	-0,064
26	289.336,720	7.474.683,205	660,189	0,189
27	289.342,269	7.474.664,471	659,930	-0,070
28	289.345,914	7.474.661,733	660,009	0,009
29	289.347,361	7.474.655,804	659,939	-0,061
30	289.351,610	7.474.651,144	660,018	0,018
31	289.350,240	7.474.646,831	659,966	-0,034
32	289.354,322	7.474.642,221	660,075	0,075
33	289.354,937	7.474.635,104	659,972	-0,028
34	289.357,445	7.474.634,274	660,057	0,057
35	289.359,026	7.474.623,287	659,983	-0,017
36	289.361,235	7.474.619,147	660,021	0,021
37	289.363,465	7.474.614,245	660,031	0,031
38	289.362,406	7.474.608,120	659,922	-0,078
39	289.373,759	7.474.595,449	660,102	0,102
40	289.371,993	7.474.586,004	659,978	-0,022
		Média		0,024
		Desvio padrão		0,132

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.11** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 670 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	289.051,707	7.474.123,298	669,877	-0,123
2	289.051,496	7.474.101,364	670,063	0,063
3	289.049,840	7.474.098,986	669,990	-0,010
4	289.049,780	7.474.096,029	670,044	0,044
5	289.047,512	7.474.095,347	669,854	-0,146
6	289.049,370	7.474.092,715	670,033	0,033

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
7	289.047,459	7.474.090,353	669,865	-0,135
8	289.049,866	7.474.086,133	669,989	-0,011
9	289.051,685	7.474.082,337	670,061	0,061
10	289.052,179	7.474.073,293	669,925	-0,075
11	289.055,396	7.474.064,678	670,110	0,110
12	289.056,402	7.474.054,243	669,858	-0,142
13	289.062,371	7.474.043,480	670,080	0,080
14	289.063,270	7.474.039,098	669,961	-0,039
15	289.066,354	7.474.032,779	670,014	0,014
16	289.065,846	7.474.030,485	669,866	-0,134
17	289.070,361	7.474.025,610	670,140	0,140
18	289.069,350	7.474.023,647	669,946	-0,054
19	289.071,403	7.474.023,541	670,154	0,154
20	289.069,604	7.474.022,572	669,921	-0,079
21	289.072,705	7.474.019,249	670,104	0,104
22	289.075,667	7.474.009,055	669,928	-0,072
23	289.077,001	7.474.007,158	670,034	0,034
24	289.076,485	7.474.004,705	669,914	-0,086
25	289.082,374	7.473.995,759	670,134	0,134
26	289.081,684	7.473.993,857	669,983	-0,017
27	289.082,933	7.473.992,074	670,106	0,106
28	289.082,509	7.473.987,147	669,966	-0,034
29	289.084,843	7.473.978,405	670,041	0,041
30	289.084,478	7.473.976,066	669,878	-0,122
31	289.086,372	7.473.974,463	670,042	0,042
32	289.086,108	7.473.971,955	669,893	-0,107
33	289.092,074	7.473.961,756	670,054	0,054
34	289.093,010	7.473.958,850	669,987	-0,013
35	289.094,442	7.473.957,137	670,053	0,053
36	289.095,030	7.473.954,759	669,988	-0,012
37	289.095,804	7.473.952,914	670,046	0,046
38	289.095,628	7.473.950,539	669,989	-0,011
39	289.116,924	7.473.528,002	670,187	0,187
40	288.512,526	7.473.370,409	671,000	1,000
			Média	0,027
			Desvio padrão	0,181

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.12** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 680 m.

<b>ID</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>HTIN(m)</b>	<b>ΔHTIN (m)</b>
1	289.196,821	7.474.088,793	679,859	-0,141
2	289.192,572	7.474.076,898	680,042	0,042
3	289.189,794	7.474.072,413	679,971	-0,029
4	289.189,730	7.474.070,214	680,026	0,026
5	289.187,921	7.474.068,254	679,982	-0,018
6	289.185,055	7.474.060,269	680,026	0,026
7	289.180,285	7.474.051,545	679,782	-0,218
8	289.181,457	7.474.028,580	680,126	0,126
9	289.176,969	7.474.013,763	679,833	-0,167
10	289.178,705	7.474.001,545	680,093	0,093
11	289.177,980	7.473.994,412	679,969	-0,031
12	289.181,176	7.473.987,911	680,092	0,092
13	289.181,571	7.473.978,418	679,886	-0,114
14	289.182,973	7.473.977,019	680,025	0,025
15	289.182,073	7.473.975,141	679,887	-0,113
16	289.183,317	7.473.973,408	680,034	0,034
17	289.182,932	7.473.971,406	679,974	-0,026
18	289.185,748	7.473.965,772	680,148	0,148
19	289.186,810	7.473.959,513	679,975	-0,025
20	289.188,493	7.473.958,233	680,088	0,088
21	289.189,029	7.473.952,187	679,703	-0,297
22	289.200,006	7.473.924,784	680,135	0,135
23	289.201,366	7.473.909,920	679,960	-0,040
24	289.203,028	7.473.903,295	680,072	0,072
25	289.204,266	7.473.893,960	679,951	-0,049
26	289.208,298	7.473.878,556	680,093	0,093
27	289.209,388	7.473.871,791	679,971	-0,029
28	289.213,022	7.473.860,453	680,091	0,091
29	289.219,679	7.473.835,460	679,970	-0,030
30	289.223,397	7.473.822,032	680,063	0,063
31	289.225,649	7.473.810,025	679,938	-0,062
32	289.226,706	7.473.808,286	680,010	0,010
33	289.226,891	7.473.806,058	679,978	-0,022
34	289.228,703	7.473.803,656	680,084	0,084
35	289.229,125	7.473.797,676	679,987	-0,013
36	289.230,063	7.473.790,950	680,059	0,059
37	289.230,349	7.473.783,743	679,937	-0,063
38	289.208,444	7.473.621,117	679,000	-1,000
39	289.205,373	7.473.599,733	680,976	0,976

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
40	289.206,492	7.473.571,365	679,299	-0,701
		Média		-0,023
		Desvio padrão		0,267

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.13** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 690 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	289.314,595	7.473.610,731	692,000	2,000
2	289.299,583	7.473.600,047	690,111	0,111
3	289.296,467	7.473.595,983	689,964	-0,036
4	289.299,370	7.473.591,474	690,160	0,160
5	289.296,734	7.473.583,497	689,936	-0,064
6	289.300,749	7.473.548,015	690,791	0,791
7	289.302,014	7.473.529,829	689,993	-0,007
8	289.303,924	7.473.524,003	690,632	0,632
9	289.296,266	7.473.514,770	689,886	-0,114
10	289.294,638	7.473.510,180	690,092	0,092
11	289.291,212	7.473.504,160	689,935	-0,065
12	289.292,497	7.473.499,283	689,905	-0,095
13	289.299,947	7.473.492,208	691,136	1,136
14	289.298,312	7.473.479,524	689,921	-0,079
15	289.305,853	7.473.473,443	691,054	1,054
16	289.310,330	7.473.464,458	692,021	2,021
17	289.286,469	7.473.450,218	690,182	0,182
18	289.280,961	7.473.456,759	689,942	-0,058
19	289.274,103	7.473.445,162	690,058	0,058
20	289.264,641	7.473.448,996	689,653	-0,347
21	289.264,812	7.473.439,652	689,765	-0,235
22	289.266,036	7.473.438,428	689,955	-0,045
23	289.267,414	7.473.430,404	690,006	0,006
24	289.264,014	7.473.425,049	689,329	-0,671
25	289.265,024	7.473.411,107	690,986	0,986
26	289.264,071	7.473.395,091	689,953	-0,047
27	289.263,628	7.473.388,608	690,036	0,036
28	289.263,482	7.473.385,600	689,955	-0,045
29	289.265,545	7.473.384,520	690,230	0,230
30	289.264,932	7.473.379,583	689,888	-0,112
31	289.264,413	7.473.355,495	690,038	0,038
32	289.265,884	7.473.346,774	690,030	0,030

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
33	289.263,381	7.473.341,475	689,991	-0,009
34	289.260,705	7.473.319,610	690,583	0,583
35	289.254,011	7.473.292,243	689,733	-0,267
36	289.254,634	7.473.281,244	690,041	0,041
37	289.253,898	7.473.279,291	689,927	-0,073
38	289.256,766	7.473.261,821	690,167	0,167
39	289.459,149	7.473.074,540	689,616	-0,384
40	289.485,303	7.473.086,089	690,209	0,209
Média				0,195
Desvio padrão				0,564

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela E.14** - Amostras das diferenças altimétricas para a curva de nível 700 m.

ID	E (m)	N (m)	HTIN(m)	$\Delta$ HTIN (m)
1	289.402,395	7.473.441,064	699,743	-0,257
2	289.393,738	7.473.399,259	699,808	-0,192
3	289.404,089	7.473.373,330	699,698	-0,302
4	289.408,513	7.473.373,732	699,903	-0,097
5	289.419,858	7.473.376,653	699,743	-0,257
6	289.407,962	7.473.425,443	699,994	-0,006
7	289.448,199	7.473.301,197	700,238	0,238
8	289.446,337	7.473.295,918	699,960	-0,040
9	289.447,819	7.473.287,557	700,118	0,118
10	289.442,924	7.473.281,247	699,911	-0,089
11	289.445,001	7.473.276,895	700,717	0,717
12	289.445,689	7.473.261,456	700,816	0,816
13	289.447,633	7.473.253,241	700,874	0,874
14	289.449,790	7.473.245,012	701,080	1,080
15	289.454,169	7.473.238,080	702,000	2,000
16	289.459,328	7.473.234,455	700,635	0,635
17	289.509,850	7.473.228,891	699,781	-0,219
18	289.518,244	7.473.254,847	702,000	-2,000
19	289.511,418	7.473.308,267	701,567	-1,567
20	289.492,606	7.473.319,141	700,628	-0,628
Média				0,041
Desvio padrão				0,880

Fonte: Elaborado pela autora.

## ANEXO A - Informações do cabeçalho do arquivo LAS

### Public Header Block

LAS Specification Versão 1.4 – R14 (2019)

Item	Format	Size	Required
File Signature (“LASF”)	char[4]	4 bytes	yes
File Source ID	unsigned short	2 bytes	yes
Global Encoding	unsigned short	2 bytes	yes
Project ID - GUID Data 1	unsigned long	4 bytes	
Project ID - GUID Data 2	unsigned short	2 bytes	
Project ID - GUID Data 3	unsigned short	2 bytes	
Project ID - GUID Data 4	unsigned char[8]	8 bytes	
Version Major	unsigned char	1 byte	yes
Version Minor	unsigned char	1 byte	yes
System Identifier	char[32]	32 bytes	yes
Generating Software	char[32]	32 bytes	yes
File Creation Day of Year	unsigned short	2 bytes	yes
File Creation Year	unsigned short	2 bytes	yes
Header Size	unsigned short	2 bytes	yes
Offset to Point Data	unsigned long	4 bytes	yes
Number of Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	yes
Point Data Record Format	unsigned char	1 byte	yes
Point Data Record Length	unsigned short	2 bytes	yes
Legacy Number of Point Records	unsigned long	4 bytes	yes
Legacy Number of Point by Return	unsigned long[5]	20 bytes	yes
X Scale Factor	double	8 bytes	yes
Y Scale Factor	double	8 bytes	yes
Z Scale Factor	double	8 bytes	yes
X Offset	double	8 bytes	yes
Y Offset	double	8 bytes	yes
Z Offset	double	8 bytes	yes
Max X	double	8 bytes	yes
Max Y	double	8 bytes	yes
Max Z	double	8 bytes	yes
Min X	double	8 bytes	yes
Min Y	double	8 bytes	yes
Min Z	double	8 bytes	yes
Start of Waveform Data Packet Record	unsigned long long	8 bytes	yes
Start of First Extended Variable Length Record	unsigned long long	8 bytes	yes
Number of Extended Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	yes
Number of Point Records	unsigned long long	8 bytes	yes
Number of Points by Return	unsigned long long[15]	120 bytes	yes