

IANN GOMES RODRIGUES DA FONSECA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL TRIDIMENSIONAL
UTILIZANDO FEIÇÕES LINEARES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS -BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F676a Fonseca, Iann Gomes Rodrigues da, 1993-
2018 Avaliação da acurácia posicional tridimensional utilizando
feições lineares / Iann Gomes Rodrigues da Fonseca. – Viçosa,
MG, 2018.
ix, 73 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Afonso de Paula dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 64-68.

1. Análise espacial (Estatística). 2. Cartografia. 3. Controle de qualidade. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 526

IANN GOMES RODRIGUES DA FONSECA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO
FEIÇÕES LINEARES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de Abril de 2018.




Maurício Galo



Paulo César Emiliano



Nilcilene das Graças Medeiros
(Coorientadora)



Afonso de Paula dos Santos
(Orientador)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Justificativa.....	4
1.4 Estrutura do trabalho.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 Controle de qualidade cartográfica	6
2.1.1 Elementos do controle de qualidade	7
2.2 Acurácia Posicional.....	8
2.3 Método de avaliação da acurácia posicional tridimensional por feições pontuais através da propagação de variâncias segundo Decreto n° 89.817.....	12
2.4 Métodos de avaliação da acurácia posicional que utilizam feições lineares	15
2.4.1 Distância de Hausdorff 3D	15
2.4.2 Influência do vértice 3D	17
2.4.3 Banda épsilon 3D	19
2.4.4 <i>Buffer</i> simples 3D.....	20
2.4.5 <i>Buffer</i> duplo 3D.....	22
2.4.5.1 Adaptação do método do <i>buffer</i> duplo proposta pelo autor.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Experimento com dados simulados.....	27
3.2 Experimento com dados reais	38
3.2.1 Área de estudo e materiais utilizados	38
3.2.2 Metodologia	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Experimento com dados simulados.....	47

4.2 Experimento com dados reais	57
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
A.1 Implementação do método da distância de Hausdorff 3D.....	69
A.2 Implementação do método da influência do vértice 3D.....	70
A.3 Implementação do método da banda épsilon 3D.....	71
A.4 Implementação do método da <i>buffer</i> simples 3D	72
A.5 Implementação do método da <i>buffer</i> duplo 3D	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo referente à qualidade da acurácia posicional absoluta	9
Figura 2 - (A) maior valor das menores distâncias dos vértices da linha de referência em relação à linha de teste e em (B) o maior valor das menores distâncias dos vértices da linha de teste em relação à linha de referência.....	16
Figura 3 - Método da influência do vértice	18
Figura 4 - Área formada pela sobreposição entre linhas homólogas no método da banda épsilon	19
Figura 5 - Área 3D formada entre as linhas homólogas no método da banda épsilon....	20
Figura 6 - Método do <i>buffer</i> simples.....	21
Figura 7 - Percentual de inclusão da linha de teste no <i>buffer</i> da linha de referência	21
Figura 8 - Método do <i>buffer</i> simples 3D.....	22
Figura 9 - Áreas formadas pela sobreposição dos Buffers (método do Buffer duplo) ...	23
Figura 10 - Normalização das áreas obtidas por meio da sobreposição dos <i>buffers</i>	24
Figura 11 - Volumes formados pela sobreposição dos Buffer 3D nas linhas de teste e referência.....	25
Figura 12 - Conjunto de linhas sintéticas de teste e referência	28
Figura 13 - Par de linhas sintéticas 1	29
Figura 14 - Par de linhas sintéticas 2.....	30
Figura 15 - Par de linhas sintéticas 3	30
Figura 16 - Par de linhas sintéticas 4	31
Figura 17 - Par de linhas sintéticas 5	32
Figura 18 - Par de linhas sintéticas 6	32
Figura 19 - Par de linhas sintética 7	33
Figura 20 - Par de linhas sintéticas 8	34
Figura 21 - Par de linhas sintéticas 9	35
Figura 22 - Par de linhas sintéticas 9	35
Figura 23 - Par de linhas sintéticas 11	36
Figura 24 - Par de linhas sintéticas 12	37
Figura 25 - Par de linhas sintéticas 13	37
Figura 26 - (a) Exemplo dos vértices de uma linha sintética (b) Exemplo dos vértices de uma linha sintética densificada	38

Figura 27 - Área de estudo, localizada nos municípios de Nova Lima e Rio Acima – MG	39
Figura 28 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no experimento com dados reais	40
Figura 29 - Metodologia para extração de feições morfológicas do terreno a partir de um MDE/MDS	42
Figura 30 - Feições lineares e pontuais utilizadas na avaliação da acurácia posicional 3D	44
Figura 31 - Discrepâncias obtidas pelo método da distância de Hausdorff 3D para o conjunto de linha sintéticas e o conjunto de linhas sintéticas densificadas	47
Figura 32 - Discrepâncias obtidas pelo método da influência do vértice 3D para o conjunto de linha sintéticas e o conjunto de linhas sintéticas densificadas	48
Figura 33 - Comparação entre os métodos da distância de Hausdorff e Influência do vértice 3D para o conjunto de linhas sintéticas originais e para as linhas densificadas..	49
Figura 34 - Discrepâncias obtidas pelo método da banda épsilon 3D	50
Figura 35 - Método do <i>buffer</i> simples 3D aplicado ao conjunto de linhas sintéticas. Gráficos do percentual de inclusão da linha de teste no sólido de referência para os pares de linhas 1 a 13.....	51
Figura 36 - Discrepâncias relativas obtidas por meio do método do <i>buffer</i> simples	52
Figura 37 - Normalização dos volumes de teste e referência para o conjunto de linhas sintéticas testadas. O termo $REF \cap TEST$ refere-se ao volume formado entre a interseção dos volumes de teste e referência. $REF \cap TEST$ faz referência ao volume contido na região de referência e não contido no teste. $REF \cap TEST$ refere-se ao volume que não está contido na referência e contido no teste.....	53
Figura 38 - Discrepâncias 3D obtidas pelo método do Buffer duplo 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 21	55
Figura 39 - Discrepâncias obtidas por diferentes métodos 3D aplicados ao conjunto de linhas sintéticas	56
Figura 40 - Avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais. (a) Gráfico das discrepâncias 3D e PEC 3D. (b) Gráfico dos valores de EP3D para amostra de pontos e RMS	58
Figura 41 - Resultados dos métodos de avaliação da acurácia posicional 3D. Gráfico das discrepâncias e RMS do Método da distância de Hausdorff (a), influência do vértice (b), banda épsilon (c), Buffer duplo (d). Resultados do <i>buffer</i> simples (e)	60
Figura 42 – Método da distância de Hausdorff 3D	69
Figura 43 – Método da influência do vértice	70

Figura 44 – Método da banda ϵ	71
Figura 45 – Método do <i>buffer</i> simples	72
Figura 46 – Método do <i>buffer</i> duplo	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerâncias planimétricas e altimétricas segundo Decreto nº 89.817	13
Tabela 2 - Características das linhas sintéticas de teste e referência	29
Tabela 3 - Tolerâncias planimétricas e altimétricas segundo Decreto nº 89.817. Tolerância tridimensional obtida por meio do cálculo da resultante entre planimetria e altimetria para a escala de 1:100.000	45
Tabela 4 - Discrepâncias 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 19...	54
Tabela 5 - Discrepâncias 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 21...	55
Tabela 6 - Avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais. Estatísticas descritivas e classificação quanto aos valores de PEC3D e EP3D	57
Tabela 7 - Estatísticas descritivas dos métodos de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares	59

RESUMO

FONSECA, Iann Gomes Rodrigues da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2018. **Avaliação da acurácia posicional tridimensional utilizando feições lineares.** Orientador: Afonso de Paula dos Santos. Coorientadora: Nilcilene das Graças Medeiros.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de metodologias para avaliação da acurácia posicional tridimensional (3D) utilizando feições lineares. É realizada uma revisão sobre controle de qualidade cartográfica e os elementos utilizados para descrever a qualidade de dados espaciais, com foco principal na acurácia posicional. Apresenta-se o método de avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais desenvolvido por Santos (2015), e os métodos que utilizam feições lineares: distância de Hausdorff, influência do vértice, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo. No *buffer* duplo, apresenta-se uma adaptação à equação para cálculo de discrepância 3D. A metodologia deste trabalho foi estabelecida em dois experimentos: o primeiro consistiu no emprego dos métodos que utilizam feições lineares a um conjunto de dados simulados, desenvolvido neste trabalho; o segundo experimento, utilizou-se de dados reais, em que através de feições morfológicas extraídas do MDS SRTM, classificou-se este produto pelos métodos de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares. O método proposto por Santos (2015) foi utilizado para validação dos resultados no experimento com dados reais. Como resultado do primeiro experimento obteve-se discrepâncias 3D para as metodologias aplicadas a dados simulados, bem como um estudo comparativo entre estes métodos. Os resultados do segundo experimento mostram a classificação do MDS SRTM para a escala de 1:100.000 obtida por diferentes métodos que utilizam feições lineares e por feições pontuais. Para o caso das feições pontuais a classificação foi Classe C, segundo as tolerâncias definidas por Santos (2015) baseado no Decreto n° 89.817. Nos métodos que utilizam feições lineares, obteve-se classe A, segundo as tolerâncias propostas neste trabalho com base no Decreto n° 89.817. Diante dos resultados, percebe-se que os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares se mostram de grande contribuição para o controle de qualidade cartográfica, uma vez que podem complementar a avaliação por feições pontuais, ou serem uma alternativa em regiões de difícil identificação de pontos homólogos.

ABSTRACT

FONSECA, Iann Gomes Rodrigues da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2018. **Evaluation of three-dimensional positional accuracy using linear features.** Adviser: Afonso de Paula dos Santos. Co-adviser: Nilcilene das Graças Medeiros.

This paper aims the study of methodologies for the evaluation of 3D positional accuracy using linear features. A review is carried out on cartographic quality control and the elements used to describe the quality of spatial data, this one with a focus on positional accuracy. It's presented the method of evaluation of 3D positional accuracy by point features, developed by Santos (2015), and the methods using linear features: Hausdorff Distance, Vertex Influence, Epsilon Band, Single Buffer and Double Buffer. In the Double Buffer, an adaptation to the equation for 3D discrepancy calculation is suggested. The methodology of this paper is separated into two experiments: the first one consisted in the use of methods that use linear features to a simulated data set, developed in this work; the second experiment used real data, in which the morphological features of the terrain were extracted to classify the MDS SRTM by 3D positional accuracy methods that use linear features. The method proposed by Santos (2015) was used to validate the results in the experiment with real data. As a result of the first experiment we obtained 3D discrepancies for the five methodologies applied, as well as a study of the efficiency of these methodologies. The results of the second experiment show the MDS SRTM classification for the 1:100,000 scale obtained by different methods using linear features and punctual features. By punctual features the classification was Class C, according to the tolerances defined by Santos (2015) based on Decree 89.817. In the methods that use linear features the result was Class A, according to the tolerances proposed in this work, based on Decree 89.817. According to the results, it can be seen that the methods of evaluating three-dimensional positional accuracy that use linear features have a great contribution to the cartographic quality control, since these can complement the evaluation by punctual features, or be an alternative in regions difficult to identify points.

1 INTRODUÇÃO

Por meio do desenvolvimento de técnicas de aquisição e manipulação de dados espaciais cada vez mais eficientes, a produção cartográfica tridimensional aumentou significativamente nos últimos anos, tornando-se tendência do mercado. Houve um crescimento expressivo na produção de modelos digitais tridimensionais como modelos digitais de elevação (MDE) e de superfície (MDS). Estes modelos auxiliam em inúmeras atividades, como projetos de engenharia, construções de estradas, barragens, estudos geomorfológicos, e outras atividades que necessitam analisar as propriedades topográficas de uma região.

Com a alta produção cartográfica tridimensional aliada a novas tecnologias, existe também um número maior de usuários não especializados, manipulando ou elaborando produtos cartográficos (GALO e CAMARGO, 1994). Por se tratar de novas tecnologias, os usuários, em algumas ocasiões, desconhecem ou desprezam a qualidade dos dados utilizados. Nesse sentido, é nítida a importância do controle de qualidade cartográfica tanto no processo de produção quanto na avaliação do produto final. Tal análise torna possível descrever a qualidade dos dados gerados e definir suas aplicações.

Para avaliar a qualidade em dados espaciais, a ISO 19157 (2013) utiliza-se de seis elementos do controle de qualidade. Cada um destes elementos descreve a qualidade dos dados a partir de uma temática, utilizando um conjunto de critérios estabelecidos.

Os elementos utilizados para inferir a qualidade dos dados são: completude, consistência lógica, acurácia temática, acurácia temporal, acurácia posicional e usabilidade (ISO, 2013). A acurácia posicional é um dos elementos de grande importância no âmbito cartográfico, uma vez que este elemento possibilita analisar a qualidade posicional da representação da superfície que está sendo definida por um produto cartográfico (GOODCHILD e GOPAL, 1989; ARIZA et al., 2008; SHI, 2010; MOZAS-CALVACHE et al., 2013; LA VEGA et al., 2016).

A avaliação da acurácia posicional é realizada por meio da comparação posicional entre feições do produto avaliado com seu correspondente em um produto de referência

(LA VEGA et al., 2016). Essa comparação pode ser feita utilizando feições lineares¹ ou pontuais.

Santos et al. (2015) e La Vega et al. (2016) evidenciam que a utilização de feições pontuais no controle de qualidade é bem difundida, e popularmente aplicada para inferir a qualidade posicional cartográfica. Pesquisas nesse sentido podem ser observadas em Giordano e Veregin (1994), Ariza-López (2002), Nogueira Júnior (2003), Nero (2005), Ariza-López e Atkinson (2008), Santos (2010), entre outros.

Sob outra perspectiva, a avaliação da acurácia posicional utilizando feições lineares vem sendo cada vez mais aplicada em regiões onde não é possível a identificação de pontos homólogos ou quando não possuem boa distribuição espacial. Além do mais, linhas contêm diversas informações geométricas que podem contribuir para a análise da acurácia em dados espaciais (SANTOS, 2015). Existem diversas técnicas de avaliação da acurácia posicional por feições lineares, sendo os métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice, banda ϵ , *buffer* simples e *buffer* duplo, os mais utilizados.

Quanto as componentes posicionais, a acurácia posicional está relacionada às componentes X, Y e Z. Tais componentes podem ser avaliadas separadamente, ou com apenas uma medida que represente a acurácia posicional 3D de um dado espacial.

Nesse contexto, a avaliação da acurácia posicional 3D utilizando-se feições pontuais pode ser vista em Santos (2015). A metodologia proposta pelo autor apresenta a avaliação através das tolerâncias planimétricas e altimétricas definidas pelo Decreto n° 89.817. Quanto ao uso de feições lineares, Mozas-Calvache e Ariza-López (2014) e La Vega et al. (2016) propõem, adaptações aos métodos da distância de *Hausdorff*, influência do vértice, banda ϵ , *buffer* simples e *buffer* duplo para a avaliação da acurácia posicional 3D. No método do *buffer* duplo, La Vega et al. (2016) apresenta o cálculo de discrepância 3D, porém o mesmo não é aplicado a dados teóricos ou reais. Além disso, a equação proposta resulta em medidas quadráticas, diferentes das discrepâncias apresentadas pelas demais metodologias.

Na avaliação da acurácia posicional 3D recomenda-se utilizar uma única medida que seja capaz de inferir a qualidade dos dados, analisando simultaneamente as componentes horizontais e verticais (LI et al., 2005; SANTOS et al., 2016).

¹ O termo feições lineares compreende o uso de polígonos, áreas e volumes ou operações elaboradas por meio de um conjunto de linhas.

Ariza-López e Atkinson (2008) concluem que várias normas internacionais e concluem que essas normas apresentam a avaliação das componentes planimétricas e altimétricas separadamente, não considerando a acurácia posicional 3D. Algumas das normas investigadas pelos autores são: *National Map Accuracy Standard (NMAS)* - Estados Unidos da América (EUA) - 1947; *Engineering map accuracy standard (EMAS)* - Associação dos Engenheiros Civis dos EUA - 1985; *Accuracy standards for large scale maps (ASLSM)* - USA; *National standard for spatial data accuracy (NSSDA)* - Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto - 1990; **STANAG 2215** - *Standard from North Atlantic Treaty Organization* – OTAN - 2002.

Apesar de vários autores (LI et al., 2005; SANTOS et al., 2016; ARIZA-LÓPEZ E ATKINSON 2008) recomendarem que a avaliação da acurácia posicional 3D seja por meio de uma única medida, percebe-se que as normas atuais que regulamentam a avaliação da acurácia posicional 3D, ainda se baseiam na avaliação das componentes planimétricas e altimétricas separadamente. No cenário brasileiro, as normas que regulamentam o controle de qualidade cartográfica seguem o mesmo modelo das normas internacionais, considerando a avaliação da acurácia posicional planimétrica e altimétrica de maneira isolada.

Devido à ausência de normas que regulamentam a acurácia posicional 3D, principalmente aquelas com ênfase em feições lineares, aliado à carência de trabalhos que abrangem esta área, percebe-se a necessidade de desenvolver metodologias que visam avaliar a acurácia posicional 3D, utilizando-se feições lineares. Tal avaliação tem grande contribuição à metodologia baseada em pontos, pois linhas possibilitam analisar aspectos que não são possíveis por meio da avaliação por feições pontuais.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo de metodologias para avaliação da acurácia posicional tridimensional utilizando feições lineares.

1.2 Objetivos específicos

Considerando o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Realizar um estudo sobre os métodos da distância de *Hausdorff*, influência do vértice, banda ϵ , *buffer* simples e *buffer* duplo para a avaliação da acurácia posicional 3D;
- Analisar a eficiência das metodologias apresentadas, por meio de sua aplicação em um conjunto de dados simulados;
- Propor uma adaptação ao método do *buffer* duplo 3D, inicialmente proposto por La Vega et al. (2016);
- Realizar experimentos utilizando dados reais, com feições características do terreno.

1.3 Justificativa

Este trabalho se justifica pela necessidade de métodos que quantifiquem as incertezas presentes em dados espaciais tridimensionais, uma vez que existem diversas atividades que demandam este tipo de dado.

Com relação à avaliação da acurácia posicional tridimensional, Santos (2015) demonstra que, ao se avaliar a acurácia posicional 3D, obtêm-se resultados mais rigorosos se comparados à avaliação das componentes altimétricas e planimétricas separadamente.

Quanto ao uso de feições lineares, seu uso se justifica devido ao fato de que ao analisar feições lineares, geralmente, se tem maior representatividade amostral, por representarem a maioria das primitivas presentes em uma base de dados cartográficos (MOZAS-CALVACHE e ARIZA-LÓPEZ, 2014). Ademais, ao utilizar feições lineares, é possível analisar aspectos como o comprimento das linhas, quantidade de vértices, distância entre os vértices, percentual de inclusão em relação a uma área de incerteza, e outras análises que não são possíveis em feições pontuais (SANTOS, 2015).

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido de acordo com a seguinte estrutura:

- Capítulo 1: Introdução - apresenta uma introdução sobre controle de qualidade cartográfica em dados espaciais, os objetivos gerais e específicos, justificativa e a importância deste estudo.
- Capítulo 2: Revisão de Literatura - Trata-se de uma revisão dos conceitos aplicados neste trabalho, em que, aborda-se o controle de qualidade cartográfica e apresenta-se os elementos que o compõem. Dentre os elementos, a acurácia posicional é destacada por ser o único elemento abordado neste estudo. Em seguida, descreve-se algumas metodologias de avaliação da acurácia posicional 3D. Tais metodologias são separadas quanto à primitiva geométrica utilizada.
- Capítulo 3: Materiais e Métodos - este capítulo descreve sucintamente as atividades desenvolvidas neste estudo, separadas em dois experimentos.
- Capítulo 4: Resultados - apresenta os resultados encontrados, bem como algumas discussões sobre cada metodologia aplicada neste estudo.
- Capítulo 5: Conclusões e Recomendações - por meio dos resultados encontrados, apresenta conclusões sobre os métodos e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Controle de qualidade cartográfica

No controle de qualidade cartográfica, existem basicamente duas formas de se inspecionar um produto cartográfico. A primeira consiste em analisar todo o processo de produção, entendendo e quantificando as incertezas inseridas em cada operação. Enquanto na segunda, estuda-se o produto cartográfico final, por meio de testes estatísticos e uma amostra de dados de referência (SANTOS et al., 2016).

O controle de qualidade no processo está relacionado à qualidade dos dados e procedimentos realizados em toda metodologia utilizada até a elaboração do produto final. Desta forma, Harding (2006) diz que o provedor de dados deve saber a finalidade de um determinado produto cartográfico para determinar a qualidade no processo de produção, com a intenção de atender os propósitos do usuário final.

De acordo com Nero (2005), um dos fatores mais importantes no controle de qualidade do processo de produção é sua finalidade. Uma vez que, conhecida claramente qual será a utilização de um produto cartográfico, é possível a elaboração de uma especificação técnica. Tal especificação permite descrever os erros admissíveis e metodologias aplicadas para elaboração de produtos específicos.

Na avaliação do produto final, o controle de qualidade estabelece medidas para avaliar o grau de adequabilidade do produto cartográfico. O controle de qualidade neste aspecto pode mostrar a um usuário ou cliente se o produto que ele deseja adquirir atende a sua necessidade, como por exemplo, se contém informações com um determinado nível de acurácia posicional (HARDING, 2006).

No Brasil, o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabelece as Normas Técnicas da Cartografia Nacional, descrevendo instruções sobre o controle de qualidade no produto final. Segundo BRASIL (1984), as instruções devem ser observadas por todas as entidades, sejam públicas ou privadas, produtoras e usuárias de serviços de natureza cartográfica. Tais instruções descritas objetivam estabelecer procedimentos a serem obedecidos na elaboração e apresentação de produtos cartográficos.

Em resumo, Santos (2015) refere-se ao controle de qualidade no processo como a avaliação de toda a cadeia produtiva, interpretando e quantificando as discrepâncias em cada operação cartográfica. Por outro lado, no controle de qualidade do produto final, a avaliação acontece por meio da comparação de um produto com dados de referência. Tal avaliação é realizada por diferentes elementos do controle de qualidade cartográfica.

2.1.1 Elementos do controle de qualidade

A ISO 19157 (2013) define que a qualidade dos dados cartográficos é descrita com base em elementos do controle de qualidade. Estes elementos descrevem a qualidade dos dados a partir de um conjunto de critérios estabelecidos. Os elementos de controle de qualidade são: completude, consistência lógica, acurácia temática, acurácia temporal, acurácia posicional e usabilidade.

Segundo a ISO 19157 (2013), completude pode ser definida pela presença ou ausência de informações de atributos e/ou feições em um conjunto de dados. Para Östman (1997), a completude está relacionada com o número de feições que estão sendo representadas em uma carta, podendo haver informações ausentes ou que não devem estar presentes em um determinado conjunto de dados. Na completude pode-se haver a comissão, quando se apresenta dados que não deveriam estar presentes no conjunto de dados, e a omissão, que se trata do problema de ausência de atributos ou feições.

A consistência lógica é definida pelo grau de aderência às regras lógicas de uma estrutura de dados ou atributos, e seus relacionamentos, podendo ser conceitual, lógico ou geométrico (ISO, 2013).

Acurácia temática diz respeito à correta representação das feições e atributos, assim como seu enquadramento nas classes definidas no modelo conceitual (DSG, 2016). Este elemento pode inferir se dados classificados em uma categoria específica estão de acordo com o modelo conceitual utilizado.

A acurácia temporal está ligada à acurácia encontrada na componente temporal de dados geoespaciais, podendo ser descrita por meio da medida temporal, que relaciona a acurácia de um atributo temporal em relação ao valor real (DSG, 2016).

De acordo com o IBGE (2017), a usabilidade é um elemento que está ligado aos requisitos específicos do usuário e/ou universos de discussão. Este elemento avalia se um

determinado produto atende as especificações de um determinado usuário. Para isso, utiliza-se de indicadores como eficácia, eficiência e satisfação num contexto de uso específico (ARAÚJO, 2016). A avaliação da usabilidade pode utilizar todos os outros elementos do controle de qualidade

A acurácia posicional pode ser descrita pelo grau de incerteza na posição da representação de uma feição em relação a sua posição dita como de referência, obtida em documento de maior qualidade (HARDING, 2006). A seguir é realizada uma descrição mais detalhada da acurácia posicional, uma vez que este elemento é o alvo principal deste estudo.

2.2 Acurácia Posicional

A ISO (2013) define acurácia posicional como a acurácia da posição das feições em um sistema de referência espacial. De acordo com DSG (2016), a acurácia posicional pode ser descrita por três subelementos:

- Acurácia posicional absoluta ou externa: é a proximidade entre valores de coordenadas de uma feição e seus valores de coordenadas de referência, obtidos com precisão superior.
- Acurácia relativa ou interna: refere-se à proximidade entre coordenadas relativas de uma posição e suas coordenadas obtidas em outro produto de maior acurácia.
- Acurácia posicional do *grid*: é a proximidade entre os valores de coordenadas de um grid e seus valores de referência.

A Figura 1 é um exemplo referente à acurácia posicional absoluta fornecido pela ET-CQDG, que demonstra uma situação de discrepância na representação de dois objetos em relação a sua posição tomada como referência. Pode-se notar que os objetos “A” e “B” se encontram deslocados em relação a sua posição de referência (linha tracejada).

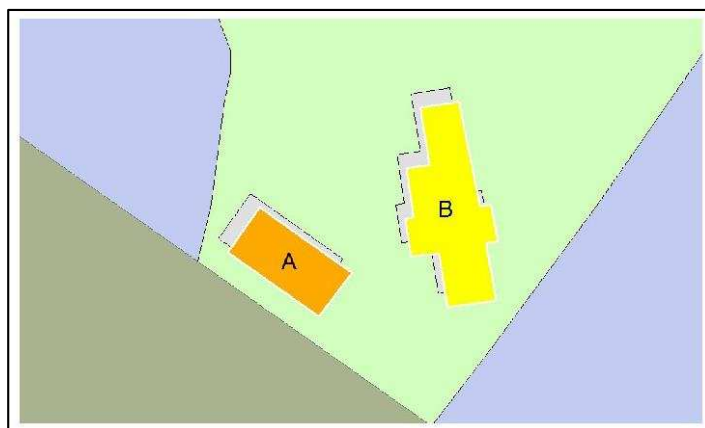


Figura 1 - Exemplo referente à qualidade da acurácia posicional absoluta

Fonte: DSG (2016)

A avaliação da acurácia posicional é realizada por meio da comparação entre feições do produto que se pretende avaliar com seu correspondente em um dado de referência (LA VEGA et al., 2016). Para isso, existem normas e padrões que definem métodos e tolerâncias para avaliar a qualidade posicional em dados espaciais. Segundo Nero (2005), na avaliação da acurácia posicional pode-se utilizar primitivas pontuais ou lineares, sendo que, cada tipo de feição possui características particulares.

Feições pontuais são elementos adimensionais, no qual a primitiva gráfica ponto é definida por meio de uma coordenada (X, Y, Z). De acordo com Hangouët (2006), feições pontuais são objetos cujo a representação geométrica é através de pontos. Ao se representar um ponto, além das coordenadas, pode-se utilizar atributos (dados não espaciais) para descrever sua representação (CÂMARA e MONTEIRO, 2004). Em um mapa pode-se utilizar este elemento para representar uma posição geográfica de fenômenos que possuem dimensões inferiores ao poder de percepção em uma dada escala.

No âmbito do controle de qualidade cartográfica, na maioria dos países, inclusive no Brasil, as normas e metodologias para avaliação da acurácia posicional de dados espaciais são baseadas em análises entre pontos homólogos (SANTOS et al., 2015). Para descrever a discrepância posicional entre pontos homólogos, basicamente utiliza-se a distância espacial entre um ponto de teste e um ponto de referência.

Feições lineares são objetos cujo sua geometria é representada através de uma linha, que é definida por segmentos de reta ou arco conectados por pontos, sendo este ponto de conexão denominado como vértice. Uma característica muito peculiar de feições lineares é a possibilidade de representar formas geométricas altamente irregulares (HANGOUËT, 2006).

O uso de feições lineares na avaliação da acurácia posicional segue o mesmo procedimento ao uso de feições pontuais, em que se constitui na comparação de feições homólogas dos dados de teste e referência. Ao se utilizar feições lineares, é possível analisar aspectos como o comprimento das linhas, quantidade de vértices, distância entre os vértices e percentual de inclusão em relação a uma área de incerteza (SANTOS et al., 2015).

Tveite e Langaas (1999) descrevem que feições pontuais podem ser mais fáceis de serem representadas e implementadas. Porém, segundo os autores, pontos não representam o nível de informações sobre acurácia quando se comparados a uma feição linear, em que existe uma infinidade de pontos contidos em um segmento de linha.

Ariza et al. (2011), sugere que a avaliação da acurácia posicional por meio de feições lineares pode complementar a avaliação por feições pontuais, especialmente em regiões com feições características específicas representadas por linhas.

De acordo com Mozas e Ariza (2011), ao se utilizar feições lineares na avaliação da acurácia posicional em dados espaciais, têm-se algumas vantagens:

- Linhas são consideradas os elementos mais abundantes em um conjunto de dados, correspondendo a aproximadamente 80% dos elementos contidos em produtos cartográficos.
- Geralmente, feições lineares contém boa distribuição espacial por serem responsáveis pela representação de rodovias, cursos d'água, entre outros elementos.
- Linhas contêm um grande número de informações geométricas, pois geralmente são definidas por grandes quantidades de vértices e segmentos.

Quanto às componentes espaciais, a avaliação da acurácia posicional 3D pode ocorrer de maneira separada, avaliando-se a planimetria independentemente da altimetria, ou apenas com uma medida que avalie simultaneamente a acurácia planimétrica e altimétrica (LI et al., 2005).

No entanto, Li et al. (2005) e Santos et al. (2016) recomendam utilizar uma única medida para se avaliar a acurácia posicional 3D, especialmente quando se trata de MDSs e MDEs, que a identificação de feições homólogas não é simples quando são comparadas as feições em uma base cartográfica ou em uma imagem orbital.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos vários trabalhos que utilizam métodos da avaliação da acurácia posicional por feições lineares e por feições pontuais (SANTOS et al. 2016). La Vega et al. (2016) mostram que a maioria dos estudos avaliam a acurácia posicional em 2D. Alguns exemplos podem ser visto por Abbas et al. (1995), Goodchild e Hunter (1997), Kagawa et al. (1999), Tveite e Langaas (1999), Johnston et al. (2000), Van Niel e McVicar (2002), Mozas e Ariza (2010), Hakaly (2010) e Mozas e Ariza (2011).

Apesar de existir vários estudos relacionados às primitivas geométricas utilizadas na avaliação da acurácia posicional, e trabalhos evidenciando a necessidade de se avaliar a planimetria e altimetria de maneira conjunta, principalmente em modelos tridimensionais, ainda são poucos os estudos que definem metodologias para avaliação da acurácia posicional 3D e principalmente se tratando de feições lineares.

Alguns trabalhos que consideram a avaliação da acurácia posicional 3D podem ser vistos em Mozas-Calvache e Ariza-López (2014), Santos (2015) e La Vega et al. (2016). Santos (2015) propõe uma nova metodologia para avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais, utilizando o padrão brasileiro. Esta metodologia é desenvolvida propagando-se as variâncias das tolerâncias planimétricas e altimétricas definidas pelo Decreto n° 89.817 e obtendo assim uma única medida para se avaliar tridimensionalmente a acurácia de um produto cartográfico. Este método desenvolvido pelo autor mostrou-se como uma alternativa mais restritiva se comparado aos resultados das análises separadas da altimetria e planimetria, comprovando-se a necessidade de avaliar as componentes horizontal e vertical de forma conjunta.

Mozas-Calvache e Ariza-López (2014) adaptaram os métodos de feições lineares da distância de Hausdorff, distância média, influência do vértice e banda épsilon para a avaliação da acurácia posicional 3D. Estes métodos são aplicados em dados reais, utilizando-se amostras de malhas rodoviárias, no qual se verifica a eficiência dos mesmos. Os resultados demonstram a viabilidade do emprego de tais metodologias para o caso de elementos tridimensionais.

La Vega et al. (2016) propõem adaptações aos modelos teóricos das metodologias da influência do vértice, distância de Hausdorff, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo para serem aplicadas na avaliação da acurácia posicional 3D. No entanto, as metodologias propostas não foram aplicadas a um conjunto de dados simulados ou reais.

2.3 Método de avaliação da acurácia posicional tridimensional por feições pontuais através da propagação de variâncias segundo Decreto n° 89.817

Essa metodologia foi desenvolvida por Santos (2015), na qual o autor objetiva desenvolver uma nova forma de avaliação da acurácia posicional 3D de MDE/MDS, utilizando o padrão brasileiro de acurácia posicional definido pelo Decreto n° 89.817.

O Decreto n° 89.817 descreve a avaliação da acurácia posicional de um produto cartográfico realizando a análise da planimetria e altimetria separadamente. Esta avaliação consiste na classificação de discrepâncias obtidas por meio da comparação entre pontos homólogos com as tolerâncias definidas pelo Decreto n° 89.817 (SANTOS, 2015).

De acordo com Santos (2015), as discrepâncias planimétricas (D_{2D}) e altimétricas são obtidas por meio da diferença algébrica entre as coordenadas (x, y, z) de um ponto i de teste (T) e a coordenada do ponto i de referência (R). As Equações 1, 2 e 3 representam as discrepâncias das componentes x, y e z . A Equação 4 representa a discrepância planimétrica (D_{2D}).

$$d_{ix} = x_{iT} - x_{iR} \quad (1)$$

$$d_{iy} = y_{iT} - y_{iR} \quad (2)$$

$$d_{iz} = z_{iT} - z_{iR} \quad (3)$$

$$d_{i2D} = \sqrt{d_{ix}^2 + d_{iy}^2} \quad (4)$$

Segundo o Decreto n° 89.817, na avaliação da acurácia da planimetria e/ou da altimetria, deve-se obedecer a duas condições (BRASIL, 1984; SANTOS, 2010; DSG, 2011; DSG,2016):

- i. 90% dos valores de discrepâncias encontrados devem ser iguais ou inferiores ao valor do padrão de exatidão cartográfica (PEC) para a classe e escala analisada.
- ii. O RMS das discrepâncias deve ser igual ou inferior ao valor do erro padrão (EP) de acordo com a norma.

Os valores do PEC e EP para avaliação planimétrica e altimétrica de um produto cartográfico definidos pelo Decreto n° 89.817 são apresentados na Tabela 1. As

tolerâncias planimétricas de cada classe são analisadas de acordo com a escala do produto avaliado. Enquanto no PEC e EP para altimetria, deve-se analisar a equidistância vertical entre curvas de nível.

Tabela 1 - Tolerâncias planimétricas e altimétricas segundo Decreto n° 89.817

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC*	EP*	PEC*	EP*
A	0,5mm	0,3mm	1/2 eq.	1/3 eq.
B	0,8mm	0,5mm	3/5 eq.	2/5 eq.
C	1,0mm	0,6mm	3/4 eq.	1/2 eq.

Fonte: Santos (2015)

*PEC e EP são tolerâncias do padrão de acurácia descrito pelo Decreto n° 89.817, sendo denominadas por Padrão de exatidão cartográfica e erro padrão, respectivamente.

Observa-se que o Decreto n° 89.817 não aborda a avaliação da acurácia 3D, pois essa análise é realizada separadamente. Segundo Santos et al. (2016), ao avaliar a planimetria e a altimetria em dados cartográficos, como modelos digitais tridimensionais (MDE/MDS), existe um grande problema na identificação de pontos homólogos, visto que muitas das vezes não é possível reconhecer estes pontos em um MDE/MDS de média e baixa resolução. Dessa forma ao avaliar a altimetria, assume-se que a planimetria do MDE/MDS acurada, o que implica na identificação errônea da coordenada Z do ponto avaliado (SANTOS et al., 2016).

Para a avaliação conjunta das componentes planimétrica e altimétrica segundo o Decreto n° 89.817, Santos (2015) utiliza da discrepância tridimensional (d_{i3D}) (Equação 5). Sendo esta, a resultante da discrepância planimétrica (d_{i2D}) e da discrepância altimétrica (D_{iz}).

$$d_{i3D} = \sqrt{d_{i2D}^2 + d_{iz}^2} \quad (5)$$

Para obter as tolerâncias para avaliação da acurácia posicional 3D, Santos (2015) realiza a propagação de variâncias da discrepância 3D, em que se obtém o desvio-padrão da discrepância 3D ($\sigma_{d_{i3D}}$) (Equação 6), em função dos desvios-padrão da discrepância planimétrica ($\sigma_{d_{i2D}}$) e altimétrica ($\sigma_{d_{iz}}$).

$$\sigma_{d_{i3D}}^2 = \frac{d_{i2D}^2}{d_{i3D}^2} \cdot \sigma_{d_{i2D}}^2 + \frac{d_{iz}^2}{d_{i3D}^2} \cdot \sigma_{d_{iz}}^2 + 2 \cdot \frac{d_{i2D} \cdot d_{iz}}{d_{i3D}^2} \cdot \sigma_{d_{i2D}d_{iz}} \quad (6)$$

Santos (2015) assume que os desvios-padrão da discrepância planimétrica e altimétrica correspondem à tolerância chamada “Erro Padrão” do Decreto n° 89.817 para a planimetria (EP_{2D}) e altimetria (EP_Z) respectivamente. Assim, o autor denomina o desvio-padrão da discrepância 3D ($\sigma_{d_{i3D}}$) como EP_{3D} . Dessa forma, obtém-se a Equação 7, na qual o EP_{3D} é em função do EP_{2D} , EP_Z , das discrepâncias planimétricas e altimétricas e a covariância entre essas variáveis. Assim, ao avaliar um produto, cada ponto terá um valor de erro padrão tridimensional. Note que a Equação 7 se aplica para valores de d_{i2D} ou d_{iZ} diferentes de zero, quando estes valores são iguais à zero, o EP_{3D} será igual ao EP_{2D} .

$$EP_{3D} = \sqrt{\frac{d_{i2D}^2 \cdot EP_{2D}^2 + d_{iZ}^2 \cdot EP_Z^2 + 2 \cdot d_{i2D} \cdot d_{iZ} \cdot \sigma_{d_{2D}d_{iZ}}}{d_{i3D}^2}} \quad (7)$$

Segundo Santos (2015), se a amostra de checagem de discrepância planimétrica for independente da discrepância altimétrica, a covariância ($\sigma_{d_{2D}d_{iZ}}$) será igual à zero. Caso contrário, o autor sugere a Equação 8 para determinar o valor da covariância.

$$\sigma_{d_{i2D}d_{iZ}} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{i2D} - \bar{d}_{2D}) \cdot (d_{iZ} - \bar{d}_Z)}{n - 1} \quad (8)$$

O Decreto n° 89.817 define que o PEC é um indicador estatístico que corresponde a 1,645 vezes o valor do EP (Equação 9). Esse valor corresponde à área abaixo da curva normal para variáveis unidimensionais, que equivale à probabilidade de 90% (SANTOS, 2015).

$$PEC_{3D} = 1,645 \cdot EP_{3D} \quad (9)$$

Dessa forma, para a aplicação do Decreto n° 89.817 na avaliação da acurácia posicional 3D, é necessário atender a duas condições (SANTOS,2015):

- I. Noventa por cento (90%) dos pontos planialtimétricos de checagem, quando comparados a um dado de referência, deverão apresentar valores de discrepâncias tridimensionais (d_{i3D}) menores ou iguais aos valores do PEC_{3D} para cada ponto, considerando o PEC planimétrico e altimétrico para a escala e classe testada.

- II. Da amostra de d_{i3D} , noventa por cento (90%) dos valores de RMS obtidos deverão apresentar valor menor ou igual ao erro padrão 3D definido para cada ponto de checagem.

2.4 Métodos de avaliação da acurácia posicional que utilizam feições lineares

No controle de qualidade cartográfica existem vários métodos que se baseiam em feições lineares, sendo que a maioria destes foi elaborada com o intuito de avaliar os resultados do processo de generalização cartográfica. Se tratando da avaliação da acurácia posicional, Santos et al. (2015), separa os métodos que utilizam feições lineares em grupos:

- a) Grupo da faixa de incertezas, que utilizam uma abordagem determinística, como o método da banda épsilon, método do *buffer* simples e *buffer* duplo;
- b) Grupo da faixa de incerteza, que utilizam uma abordagem estocástica como o método da Banda Genérica e Modelo de Erros Estatístico por Simulação;
- c) Grupo de métodos determinísticos, que utilizam análises geométricas, como a distância de Hausdorff, influência do vértice, Aproximação por Spline e Ponto Gerado.

Neste trabalho, serão detalhados os métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo. Todos estes métodos têm como objetivo fornecer uma medida de discrepância posicional entre as linhas homólogas das feições a serem analisadas. Em seguida pode-se aplicar algum padrão ou norma de acurácia posicional.

2.4.1 Distância de Hausdorff 3D

Proposto por Abbas (1994), este método consiste em um procedimento de comparação das linhas homólogas, aplicando a distância de Hausdorff. Essa medida foi inicialmente desenvolvida para medir distâncias entre conjuntos.

Na cartografia, a distância de Hausdorff tem grande importância, visto que é possível quantificar relações espaciais entre objetos. Dessa forma, esta técnica permite calcular a distância entre objetos, ou analisar o comportamento de uma feição que sofreu

processos de generalização cartográfica em relação à feição de origem (HANGOUËT, 1995). A distância de Hausdorff é amplamente usada em análises de similaridade de dados vetoriais e matriciais (ARIZA et al., 2011).

Segundo Hangouët (1995), a distância de Hausdorff pode ser definida como a distância real entre dois objetos. Aplicando-a em pontos homólogos, esta medida não se difere da distância euclidiana. Porém quando se refere a feições lineares, a distância de Hausdorff será o máximo valor por meio das menores distâncias euclidianas entre as linhas.

O conceito do método da distância de Hausdorff aplica-se a todos os pontos pertencentes à linha (infinitos pontos entre os vértices), contudo, devido ao imenso esforço computacional, em sua implementação em um ambiente de sistema de informações geográficas (SIG) são considerados apenas os vértices que formam a linha (ARIZA et al., 2011).

O método da distância de Hausdorff (Equação 10) aplicado a um conjunto de linhas homólogas consiste em obter o maior valor das menores distâncias (d_r) de cada vértice da linha de referência (L_r) em relação à linha de teste (L_t), e o maior valor das menores distâncias (d_t) de cada vértice da linha de teste (L_t) em relação à linha de referência (L_r), como mostrado na Figura 2. Por fim, a distância de Hausdorff (DH) será o maior valor entre d_r e d_t (ARIZA, 2002).

$$DH = \max(d_r, d_t) \quad (10)$$

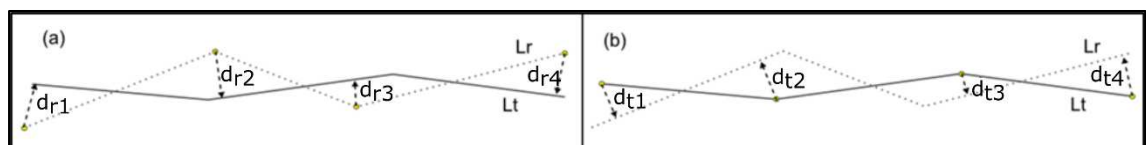


Figura 2 - (A) maior valor das menores distâncias dos vértices da linha de referência em relação à linha de teste e em (B) o maior valor das menores distâncias dos vértices da linha de teste em relação à linha de referência

De acordo com Mozas e Ariza (2010), a distância de Hausdorff fornece o máximo deslocamento entre feições lineares, sendo assim, é muito sensível a qualquer mudança nos vértices ou a presença de *Outliers*. Para minimizar estes efeitos, Mozas (2007) propõe obter os valores de d_r e d_t por meio da média das menores distâncias entre os vértices da linha de teste com relação à linha de referência e vice-versa (Equação 11).

$$d_r = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ri}}{n} ; d_t = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ti}}{n} \quad (111)$$

Em virtude do método da distância de Hausdorff ter como princípio básico medidas de distância, sua aplicação para o caso 3D se difere apenas no cálculo de distância, que neste caso, é considerada a componente altimétrica. A Equação 12 mostra o cálculo da distância entre dois pontos (p e q) no espaço 3D.

$$d = \sqrt{(X_q - X_p)^2 + (Y_q - Y_p)^2 + (Z_q - Z_p)^2} \quad (122)$$

Os passos a seguir descrevem o método da distância de Hausdorff 3D:

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste (L_t) e referência (L_r);
2. Extrair os vértices das linhas de teste e referências;
3. Calcular a menor distância 3D (Equação 12) para cada vértice da linha de referência em relação à linha de teste e calcular a média entre as mesmas (dr);
4. Calcular a menor distância 3D (Equação 12) para cada vértice da linha de teste em relação à linha de referência e calcular a média entre as mesmas (dt);
5. A distância de Hausdorff (DH) é definida pelo maior valor entre dr e dt .

2.4.2 Influência do vértice 3D

De acordo com Mozas e Ariza (2011), geralmente, linhas são formadas através de processos de digitalização, restituição ou extração automática. Desta forma, uma linha é construída por meio de um conjunto de vértices e segmentos derivados destes. Perante o exposto, os autores afirmam que os vértices são elementos que definem a estrutura e o comportamento de uma linha, sendo um elemento fundamental no controle de qualidade cartográfica.

Este método considera que cada vértice de uma linha determina uma posição e envolve os segmentos adjacentes, ou seja, qualquer deslocamento em um determinado vértice afeta apenas os dois segmentos adjacentes a ele (MOZAS e ARIZA, 2011).

O método da influência do vértice consiste na medida de distância dos vértices da linha de referência (L_r) para a linha de teste (L_t). Essas distâncias são ponderadas em função do comprimento dos segmentos adjacentes ao vértice analisado (L^{i-1} e L^i). Ao final, calcula-se a média aritmética ponderada usando o comprimento da linha de referência (CL_r), e assim, obtém-se a discrepância média (D) entre as linhas, conforme a Figura 3.

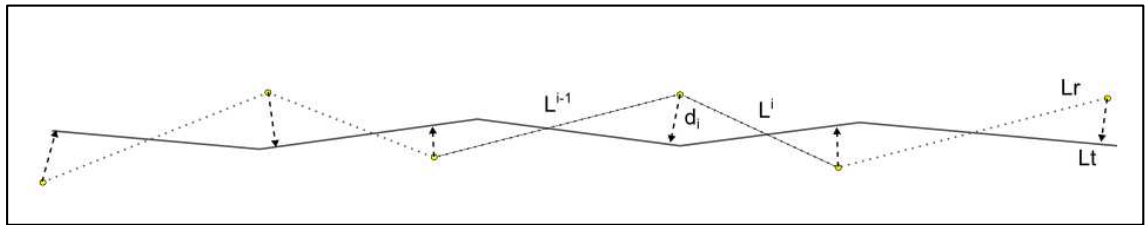


Figura 3 - Método da influência do vértice

A Equação 13 descreve o cálculo da discrepância média (D) obtida pelo método da influência do vértice.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i (L^{i-1} + L^i))}{2CL_r}, \quad (133)$$

em que:

n : é o número de vértices contidos na linha de referência;

d_i : é a distância mínima entre o vértice i até a linha de teste;

CL_r : corresponde ao comprimento total da linha de referência;

L^{i-1} e L^i são os comprimentos dos segmentos adjacentes ao vértice i , no qual L^0 e L^n são iguais a zero.

De acordo com La Vega et al. (2016), a definição do método da influência do vértice 2D pode ser aplicado ao caso 3D. Desse modo, as métricas de distância são calculadas segundo a Equação 12. Portanto, a aplicação do método da influência do vértice em feições lineares 3D pode ser descrita por meio dos seguintes passos:

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste (L_t) e referência (L_r);
2. Extrair os vértices de cada linha de teste e referência;
3. Calcular a menor distância 3D (d_i) para cada vértice i da linha de referência até a linha de teste;

4. Calcular o comprimento 3D dos segmentos adjacentes ao vértice i da linha de referência;
5. Calcular o comprimento total 3D da linha de referência e por fim calcular a discrepância média 3D (d) para cada linha avaliada, segundo a Equação 13.

2.4.3 Banda épsilon 3D

Perkal (1966) desenvolveu uma medida de incerteza aplicada a linhas e segmentos, descrita como banda épsilon. Essa medida é geralmente utilizada para estimar a largura mínima de um *buffer* ao longo de um objeto de referência que contém completamente a feição testada (GOODCHILD E HUNTER, 1997).

Adaptado por Masry et al. (1980) e Blakemore (1984), o método da banda épsilon consiste em gerar uma medida de discrepância posicional (ϵ) baseada na razão entre o somatório das áreas (A) formadas pela sobreposição entre pares de linhas homólogas e o comprimento da linha de teste (L_T), segundo a Equação 14 e a Figura 4. Este método também é conhecido como método das áreas, e foi utilizado por diversos autores no Brasil (LUGNANI, 1984; GALO et al., 2001; VIEIRA et al. 2002).

$$\epsilon = \frac{\sum A}{L_T} \quad (144)$$

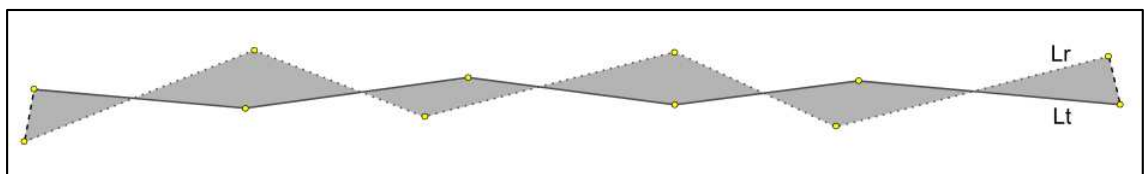


Figura 4 - Área formada pela sobreposição entre linhas homólogas no método da banda épsilon

O método da banda épsilon 3D segue a mesma premissa descrita no caso 2D, no qual, obtém-se uma medida de discrepância por meio da razão entre o somatório das áreas geradas entre pares de linhas homólogas e o comprimento da linha de teste. A Equação 14 pode ser aplicada para este caso, sendo que as diferenças estão no comprimento da linha de teste, que será o comprimento 3D, e o cálculo da área formada entre as linhas homólogas.

Segundo Mozas-Calvache e Ariza-López (2014), o cálculo da área formada entre as linhas analisadas não é simples como para os casos em 2D, devido ao fato de que as

linhas avaliadas em 3D geralmente estão em planos distintos. Para realizar o cálculo da área 3D formada entre linhas homólogas, os autores sugerem realizar um processo de triangulação (Figura 5). Dessa forma, a área total entre as linhas homólogas é o resultado da soma das áreas dos triângulos formados. A área de um triângulo em 3D (A) é obtida através da equação 15.

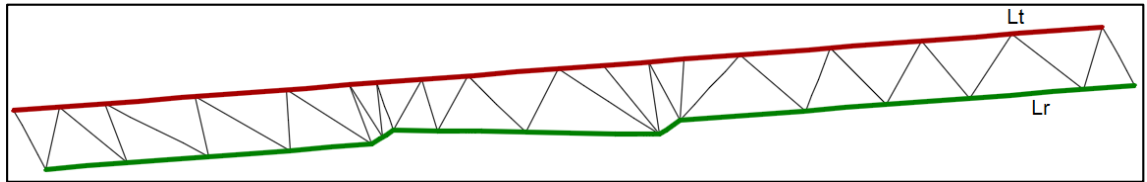


Figura 5 - Área 3D formada entre as linhas homólogas no método da banda épsilon

$$A = \sqrt{A_{XY}^2 + A_{XZ}^2 + A_{YZ}^2} \quad (155)$$

em que:

A : é área em 3D de um triângulo;

A_{XY} , A_{XZ} , A_{YZ} : representa a área em 2D das projeções de um triângulo 3D nos planos XY, XZ e YZ respectivamente.

Os passos para o desenvolvimento do método da banda épsilon em feições lineares 3D:

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste (L_t) e referência (L_r);
2. Realizar a sobreposição entre as linhas de teste e de referência;
3. Realizar a triangulação da área formada entre as linhas de teste e referência, decompondo-as em áreas menores;
4. Realizar o cálculo de todas as áreas formadas entre as linhas homólogas (equação 15);
5. Obter o comprimento 3D da linha de teste (L_T);
6. Calcular a discrepância posicional (ϵ) para cada par de linhas avaliado (equação 14).

2.4.4 Buffer simples 3D

Desenvolvido por Goodchild e Hunter (1997), este método analisa o percentual de inclusão da linha de teste em relação à área formada por um *buffer* aplicado à linha de referência (Figura 6). De acordo com Santos et al. (2015), nesta metodologia, a largura

da banda de erro é definida quando o percentual de inclusão da linha de teste atinge uma tolerância pré-definida (geralmente de 90% a 95%), para uma dada largura do *buffer* aplicado à linha de referência.

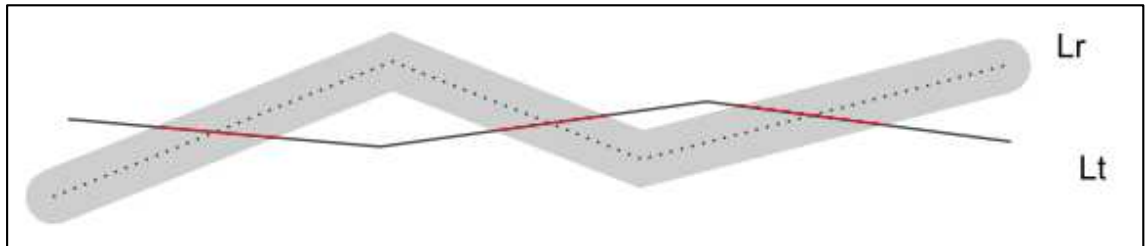


Figura 6 - Método do *buffer* simples

O percentual de inclusão ($P(x)$) da linha de teste sobre a área de *buffer* de largura x gerado a partir da linha de referência é obtido por meio da Equação 16. O termo C_{Lx} representa o comprimento total dos segmentos que estão contidos na região de *buffer* de referência e C_{Lt} , o comprimento total da linha de teste.

$$P(x) = \frac{C_{Lx}}{C_{Lt}} \times 100 \quad (166)$$

Goodchild e Hunter (1997) descrevem que este método desenvolvido apresenta uma abordagem mais robusta e menos sensível a *outliers* quando comparado ao método da banda épsilon.

O método do *buffer* simples permite obter a distribuição de probabilidade de inclusão da linha de teste na região de referência (Figura 7), por meio da variação da largura do *buffer* (GOODCHILD e HUNTER, 1997; ARIZA et al., 2011; SANTOS et al., 2015).

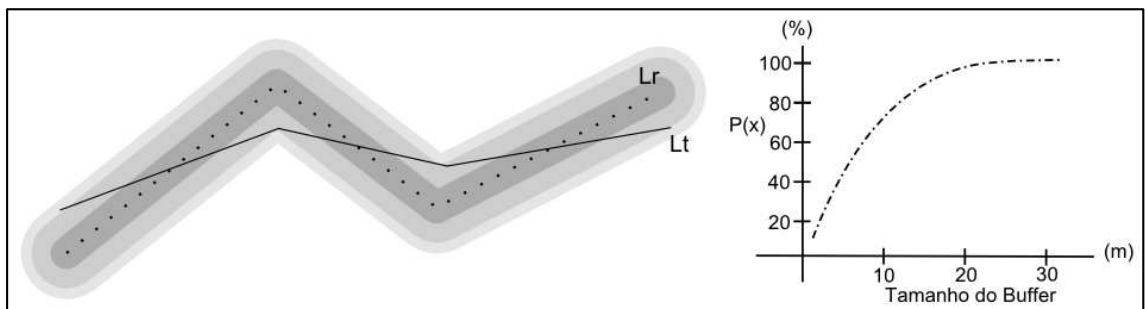


Figura 7 - Percentual de inclusão da linha de teste no *buffer* da linha de referência

A distribuição de probabilidade proporciona valores de incerteza dependendo do nível de confiança associado. Portanto, é possível estimar a qualidade relativa de um

conjunto de dados por meio da largura do *buffer* necessária para atingir o nível de confiança pré-definido.

Segundo La Vega et al. (2016), para aplicar o método do *buffer* simples aos casos em 3D é necessário utilizar ferramentas que possibilitem produzir *buffers* 3D e realizar operações de interseção com sólidos e linhas.

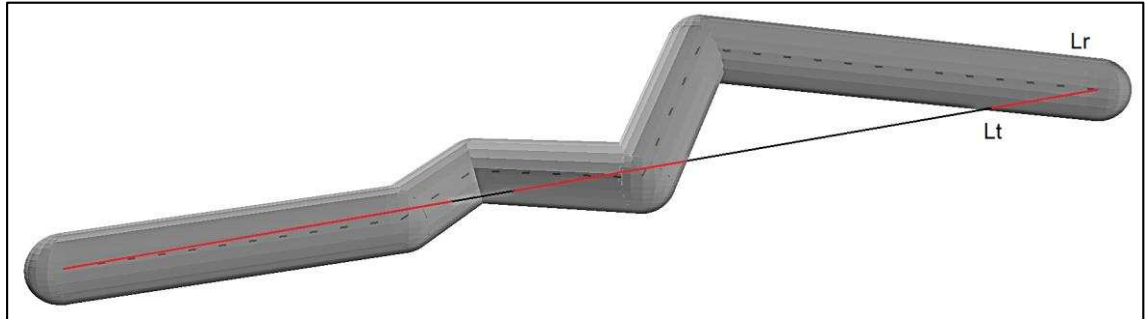


Figura 8 - Método do *buffer* simples 3D

Sendo assim, o método do *buffer* simples 3D (Figura 8) consiste em analisar o percentual de inclusão da linha de teste em relação ao volume obtido do sólido gerado da aplicação do *buffer* 3D. A aplicação deste método pode ser representada pelas etapas:

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste (L_t) e referência (L_r);
2. Calcular o comprimento 3D de cada linha de teste (C_{L_t});
3. Gerar um sólido de referência por meio da aplicação de um *buffer* 3D de largura x para cada linha de referência;
4. Realizar a interseção entre as linhas homólogas de teste e o *buffer* 3D nas linhas de referência;
5. Calcular o comprimento 3D de todos os segmentos da linha de teste que estão contidos no sólido de referência (C_{L_x});
6. Calcular o percentual de inclusão da linha de teste sobre o sólido de referência (Equação 16).

2.4.5 *Buffer* duplo 3D

Este método proposto por Tveite e Langaas (1999), também conhecido por *buffer overlay statistics*, foi desenvolvido baseado no método do *buffer* simples, elaborado por Goodchild e Hunter (1997).

Basicamente, este método utiliza medidas de *buffer* para descrever o comportamento das linhas avaliadas. Diferente do método do *buffer* simples, o método do *buffer* duplo aplica o *buffer* nas linhas de teste e referência, formando polígonos e realizando operações de interseção entre eles (SANTOS et al, 2015). As análises realizadas neste método, em ambiente 2D, podem ser separadas em três passos:

1. Executar a operação de *buffer* com largura x , nas linhas de teste e referência, obtendo assim os polígonos de teste (B_T) e de referência (B_R).
2. Realizar uma operação de sobreposição (*overlay*) entre os polígonos B_T e B_R , podendo formar quatro diferentes áreas (Figura 9):

Área tipo a. Área não contida em ambos os polígonos B_T e B_R : ($\overline{B_T} \cap \overline{B_R}$);

Área tipo b. Área não contida em B_T e contida em B_R : ($\overline{B_T} \cap B_R$)

Área tipo c. Área contida em B_T e não contida em B_R : ($B_T \cap \overline{B_R}$)

Área tipo d. Área resultante da interseção entre B_T e B_R : ($B_T \cap B_R$)

3. Cálculo da discrepância posicional entre as feições lineares.

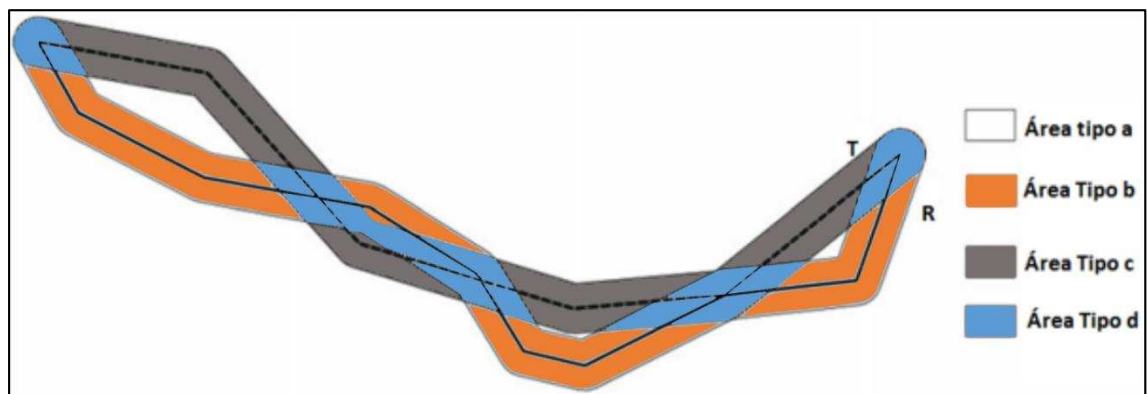


Figura 9 - Áreas formadas pela sobreposição dos Buffers (método do Buffer duplo)

Segundo Tveite e Langaas (1999), este método deve ser realizado de forma iterativa, visto que é necessário obter a largura do *buffer* ideal para o conjunto de dados avaliado. O processo de iteração pode ser iniciado utilizando uma largura de *buffer* inicial (a largura inicial do *buffer* pode ser determinada em função da acurácia dos dados de referência). Para cada iteração aumenta-se a largura do *buffer* até que o resultado se estabilize.

Neste processo serão analisadas, as áreas do tipo *b*, *c* e *d* (Figura 9) normalizadas (Figura 10). A normalização é realizada por meio da divisão de cada área pelo valor da área formada da união entre as áreas do *buffer* de referência e teste ($B_T \cup B_R$).

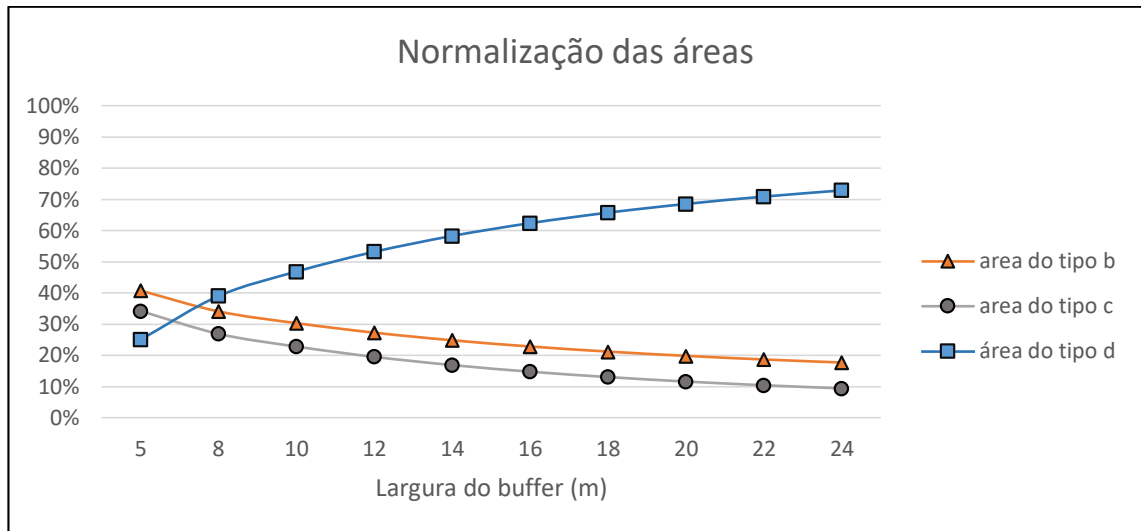


Figura 10 - Normalização das áreas obtidas por meio da sobreposição dos *buffers*

Segundo Tveite e Langaas (1999), no gráfico da normalização das áreas, as curvas formadas pelas áreas do tipo *b* e *c* podem, ou não, serem coincidentes (está relacionado à diferença entre o comprimento da linha de referência) e sempre cruzam com a curva formada pela curva da área do tipo *d*. Os valores da largura de *buffer* para os pontos de cruzamento entre as curvas do gráfico, podem ser utilizados como a largura ótima de *buffer* em um conjunto de dados. Esse valor de *buffer* é também um indicador da acurácia relativa dos dados.

De acordo com Tveite e Langaas (1999), para o caso 2D, ao aplicar um *buffer* na linha de teste e na linha de referência, tem-se uma ponderação das incertezas, podendo obter uma medida de discrepância média (Equação 17).

$$DM_i = \frac{\pi \cdot x \cdot (\text{Área (Tipo b)})}{\text{Área (B}_{Ti})} \quad (177)$$

Tveite e Langaas (1999) propõem uma medida de oscilação (Equação 18) que possibilita determinar a presença de tendência, devido ao fato de que essa medida permite indicar a posição da linha testada em relação à linha tida como referência (LA VEGA et al., 2016). A oscilação é obtida por meio da razão entre a área não contida em B_T e contida em B_R (*Área (Tipo b)*), e o comprimento total da linha de teste (L_t).

$$O = \frac{\text{Área (Tipo b)}}{L_t} \quad (188)$$

Tveite e Langaas (1999) ressaltam que a implementação deste método é relativamente fácil, uma vez que necessita de ferramentas básicas em Sistemas de Informações Geográficas (operações de *buffer* e *overlay*).

Segundo La Vega et al. (2016), o método do *buffer* duplo 3D realiza operações com *buffers* 3D para descrever o comportamento da linha de teste em relação aos dados de referência. Ao se aplicar os *buffers* 3D nas linhas de teste e referência e realizar operações de sobreposição com os sólidos gerados, obtêm-se quatro diferentes volumes (Figura 11):

Volume tipo a. Volume não contido em B_T e B_R : $(\overline{B_T} \cap \overline{B_R})$;

Volume tipo b. Volume não contido em B_T e contido em B_R : $(\overline{B_T} \cap B_R)$

Volume tipo c. Volume contido em B_T e não contido em B_R : $(B_T \cap \overline{B_R})$

Volume tipo d. Volume contido em ambos B_T e B_R : $(B_T \cap B_R)$

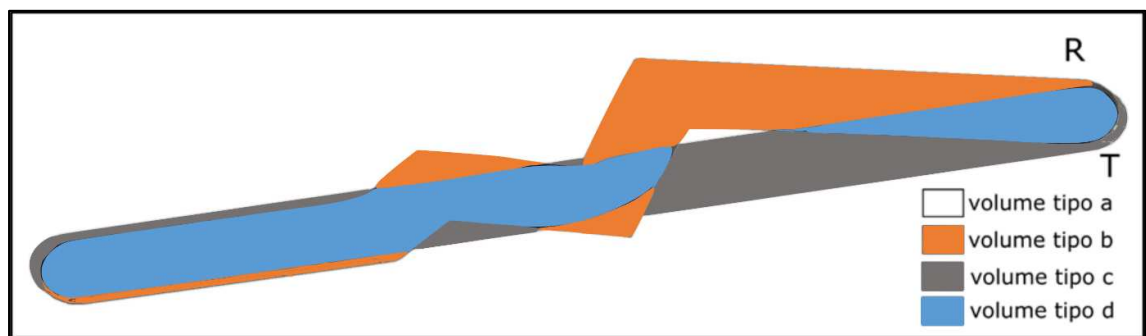


Figura 11 - Volumes formados pela sobreposição dos Buffer 3D nas linhas de teste e referência

De acordo com La Vega et al. (2016), para os casos em 3D, as medidas de discrepância média e oscilação devem ser modificadas. Os autores sugerem utilizar o volume ao invés das áreas analisadas nas medidas de discrepância média (Equação 19) e oscilação (Equação 20).

$$DM_{3D} = \frac{\pi^2 \cdot x^2}{2} \cdot \frac{\text{Volume (Tipo b)}}{\text{Volume (} B_{Ti} \text{)}} \quad (19)$$

$$O_{3D} = \frac{\text{Volume (Tipo b)}}{L_t} \quad (20)$$

Analisando as Equações 19 e 20 sugeridas por La Vega et al. (2016), deve-se atentar ao fato de que as medidas de discrepância média e oscilação em 3D retornam valores em unidades de área, diferente dos métodos 3D apresentados anteriormente. Outro fato que

se deve considerar, é que os autores apenas sugerem as equações, não apresentando nenhuma dedução das mesmas, ou aplicando-as em casos simulados ou reais.

2.4.5.1 Adaptação do método do *buffer* duplo proposta pelo autor.

Conforme mencionado a inconsistência do resultado da aplicação da formulação do *buffer* duplo 3D proposto por La Veja et al. (2016), este trabalho propõe uma adaptação da formulação do *buffer* duplo 3D. Baseado em testes práticos utilizando medidas de *buffer* 3D em um conjunto de dados sintéticos utilizado neste trabalho, foi proposta a Equação 21. Tal equação permite obter medidas de discrepância 3D em unidades lineares, através do cálculo da multiplicação da largura do *buffer* razão entre volumes, para o método do *buffer* duplo 3D.

$$DMA_{3D} = \frac{\pi \cdot x}{2} \cdot \frac{(Volume (Tipo b))}{Volume (B_{Ti})} \quad (201)$$

Para aplicar este método a um conjunto de linhas é necessário realizar os seguintes passos:

1. Selecionar uma amostra de n linhas homólogas de teste (L_t) e referência (L_r);
2. Aplicar o *buffer* 3D nas linhas homólogas, gerando sólidos de referência e teste. Quando não é definida a largura (x) do *buffer* a ser utilizado, recomenda-se realizar o processo iterativo descrito nessa seção;
3. Realizar as operações de sobreposição dos sólidos gerados, quantificando os volumes gerados pelo Buffer 3D;
4. Calcular a discrepância média 3D (Equação 19 ou 21).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste no emprego de métodos para avaliação da acurácia posicional 3D por meio de feições lineares. Os métodos da distância de Hausdorff 3D, influência do vértice 3D, banda épsilon 3D e *buffer* simples 3D foram implementados no software ArcGIS por meio da ferramenta de construção de rotinas de geoprocessamento: *Model Builder*. Utilizou-se o software AutoCad para o emprego do método do *buffer* duplo 3D (Apêndice 1).

Na metodologia empregada foram realizados dois experimentos. No primeiro, aplicaram-se os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D em um conjunto de dados simulados, formado por linhas sintéticas de teste e referência, elaboradas em ambiente CAD.

O segundo experimento consistiu na aplicação das metodologias que utilizam feições lineares em um conjunto de dados reais, utilizando-se feições características dos terrenos, como linhas de cumeada e hidrografia numérica. Os dados de teste foram extraídos do MDS *Shuttler Radar Topographic Mission* – Banda X (SRTM) e os dados de referência por meio de um MDS obtido por aerofotogrametria. Com a finalidade de validar os resultados encontrados, empregou-se a metodologia de avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais, desenvolvida por Santos (2015), em pontos homólogos de cumeada e confluência do MDS SRTM e MDS de referência.

3.1 Experimento com dados simulados

O conjunto de dados utilizados consiste em 13 pares de linhas sintéticas criadas em ambiente CAD (software AutoCad), com base nos conjuntos de linhas sintéticas elaborado por Mozas e Ariza (2008), e Mozas e Ariza (2011).

Os pares de linhas sintéticas possuem informações tridimensionais e diferentes propriedades, com incertezas simuladas, para que seja possível observar o comportamento destes dados nas metodologias utilizadas. A Figura 12 mostra todo o conjunto de linhas sintéticas com vista no plano XY (Figura 12a) e em perspectiva (Figura 12b).

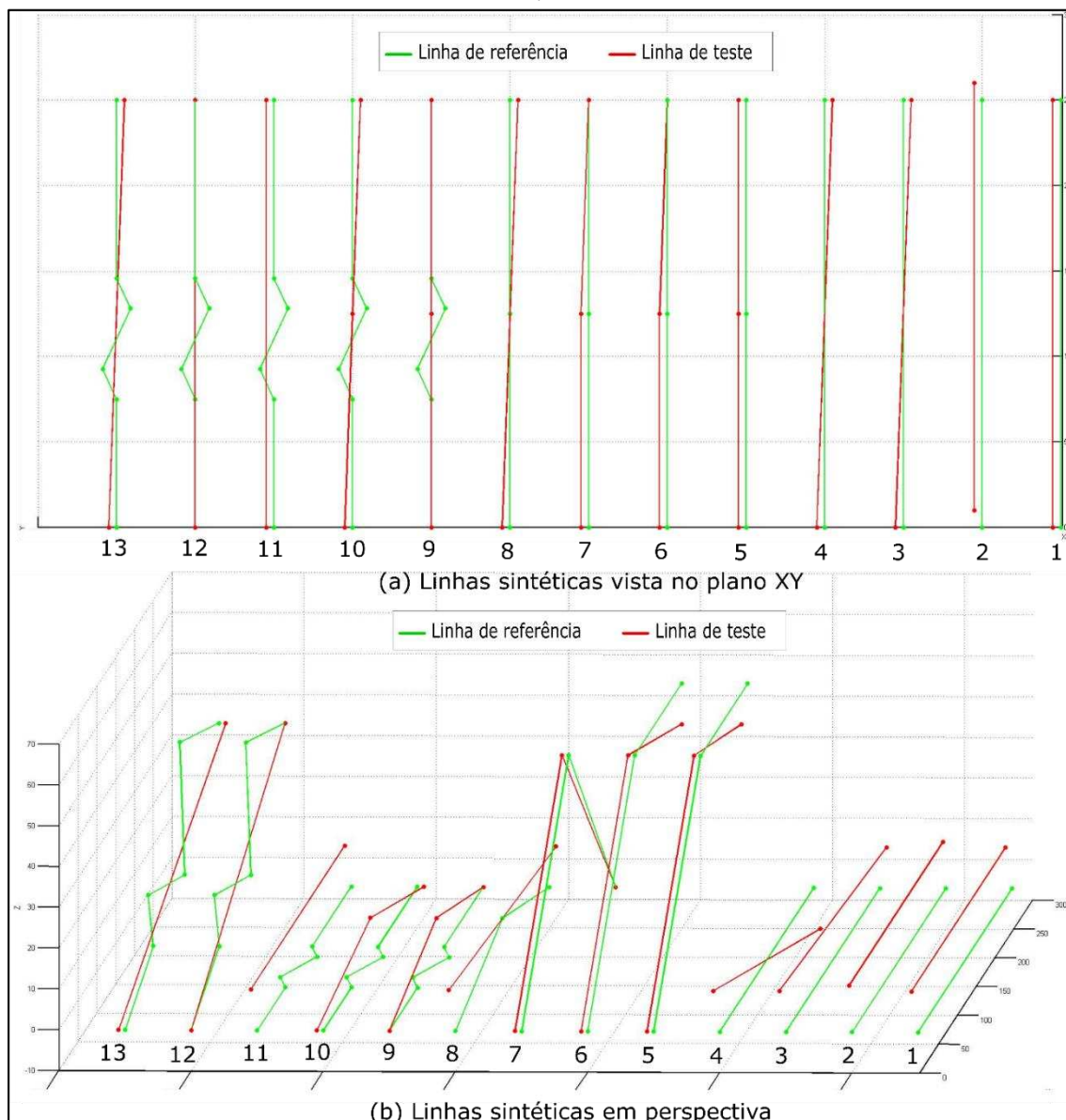


Figura 12 - Conjunto de linhas sintéticas de teste e referência

Em geral, as linhas têm relativamente o mesmo comprimento (entre 250 a 300 m), variando a quantidade de vértices (Tabela 2). As linhas de teste podem conter translação e ou rotação em relação a sua referência, ou ainda, a ausência de vértices, simulando processos de generalização cartográfica. Note que os pares de linhas 3, 6, 7, 8, e 11 se interceptam.

Este conjunto de dados pode ser separados em três grupos. O primeiro grupo é composto com os pares de linhas 1 a 4, que representam linhas mais simples formadas por apenas um segmento. O segundo grupo contém os pares de linhas 5 a 8, que são linhas formadas por dois segmentos. As linhas 9 a 13 contem formas mais complexas e formam o terceiro grupo

Tabela 2 - Características das linhas sintéticas de teste e referência

ID	Comprimento (m)		Número de vértices	
	Referência	Teste	Referência	Teste
1	250,00	250,00	2	2
2	250,00	250,00	2	2
3	250,00	250,80	2	2
4	250,00	251,59	2	2
5	259,63	260,03	3	3
6	259,63	260,43	3	3
7	269,26	269,63	3	3
8	250,80	250,80	3	2
9	279,29	250,80	6	3
10	279,29	251,59	6	3
11	279,29	250,00	6	2
12	296,41	253,18	6	2
13	296,41	253,97	6	2

O par de linhas sintéticas de número 1 (Figura 13) representa dois segmentos de linha de mesmo comprimento, em que a linha de teste é paralela à linha de referência a uma distância de 10 m em relação aos planos XY e XZ, totalizando em uma distância 3D de 14,14 m.

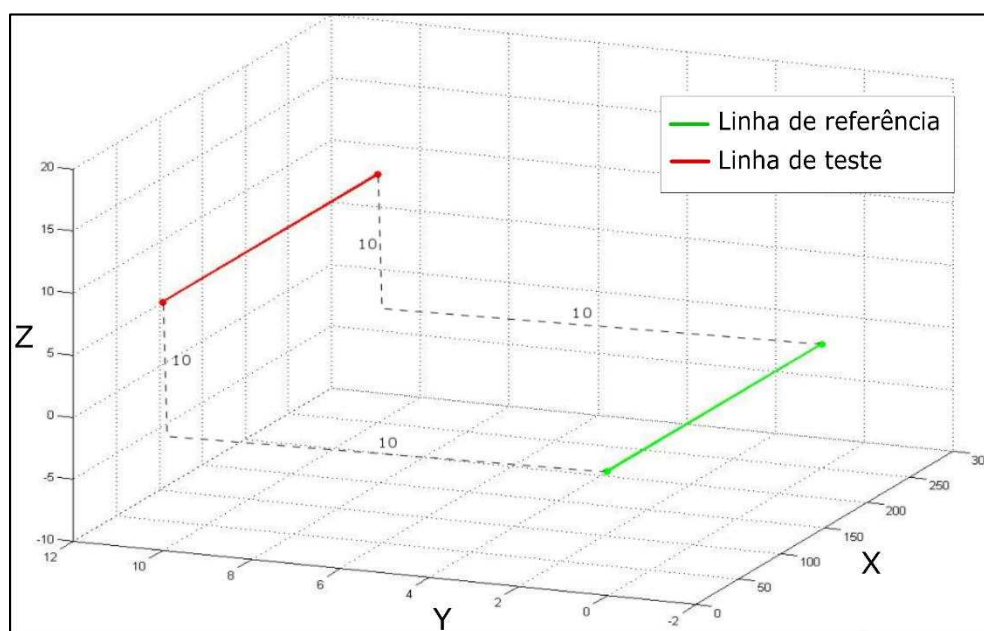


Figura 13 - Par de linhas sintéticas 1

O par de linhas sintéticas de número 2 (Figura 14) representa dois segmentos de linha de mesmo comprimento, em que a linha de teste é paralela à linha de referência a uma distância de 10 m em relação aos planos XY, XZ e YZ, totalizando em uma distância 3D de 17,32 m.

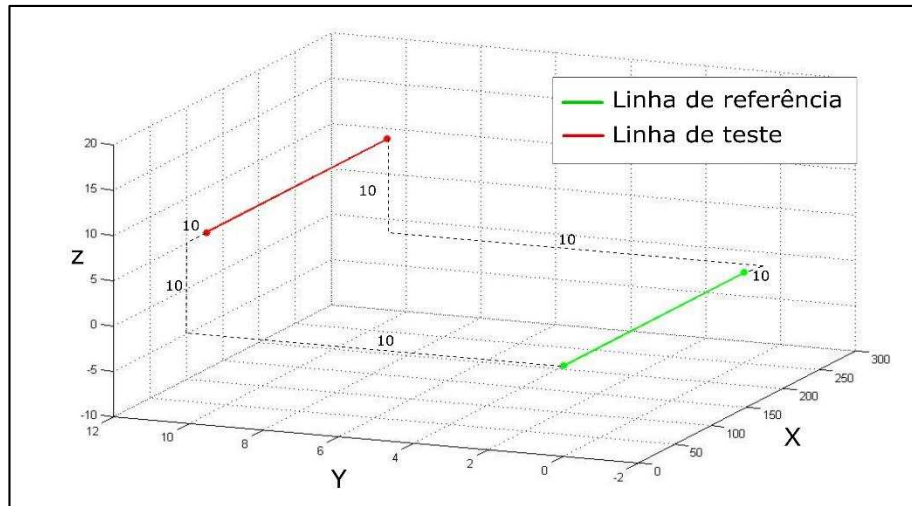


Figura 14 – Par de linhas sintéticas 2

No terceiro par de linhas sintéticas (Figura 15), a linha de teste e de referência são retas reversas, no qual o vértice inicial e final da linha de teste está a 10 m de distância nos planos XY e XZ (distância 3D de 14,14 m) em relação aos vértices homólogos da linha de referência. Neste caso, existe uma rotação em relação ao eixo Z na linha de teste. A linha de teste sofre um pequeno aumento para que os vértices iniciais e finais se mantenham à mesma distância de seu homólogo na linha de referência.

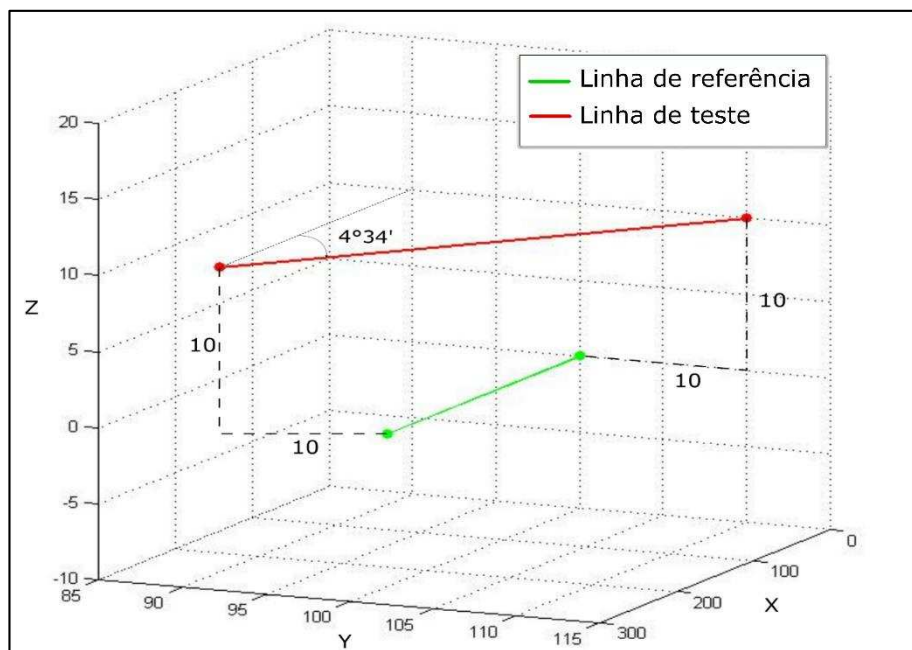


Figura 15 - Par de linhas sintéticas 3

No par de linhas sintéticas 4 (Figura 16), a linha de referência é a mesma utilizada nos pares de linhas 1 ,2 e 3. A linha de teste contém o mesmo ângulo de rotação aplicado

na linha de teste do par de linhas 3, e com outra rotação de mesmo ângulo no eixo Y, de forma que estas linhas se interceptem. A distância entre os vértices homólogos deste par de linhas continua com mesmo valor de distância, porém, com direções distintas nos eixos Y e Z.

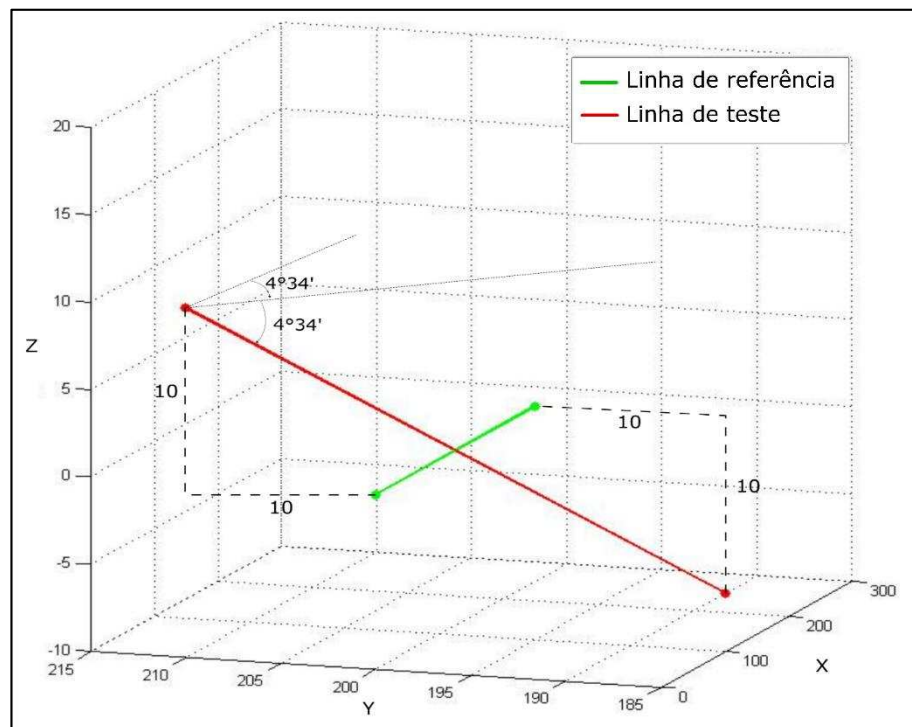


Figura 16 - Par de linhas sintéticas 4

No par de linhas sintéticas 5 (Figura 17), as linhas de teste e referência são formadas por dois segmentos de reta. Na linha de referência, o primeiro segmento tem aproximadamente 135 m e uma deflexão $21^{\circ}50'$ no plano XZ, de modo que o vértice final deste segmento se encontre a 50 m acima do vértice inicial (em relação ao eixo Z). O segundo segmento da linha de referência tem comprimento de 125 m e uma deflexão de $21^{\circ}50'$ no plano XZ de forma que este segmento fique paralelo plano XY.

Na linha de teste, seu primeiro segmento tem aproximadamente 135 m de comprimento e é paralelo ao primeiro segmento da linha de referência a uma distância de 10 m no eixo Y. Já o segundo segmento da linha de teste tem uma deflexão de $26^{\circ}25'$ no plano XZ. Dessa forma, o vértice final da linha de teste está a uma distância 3D de 14,14 m (10 m nos eixos Y e Z), quando comparado ao vértice final da linha de referência.

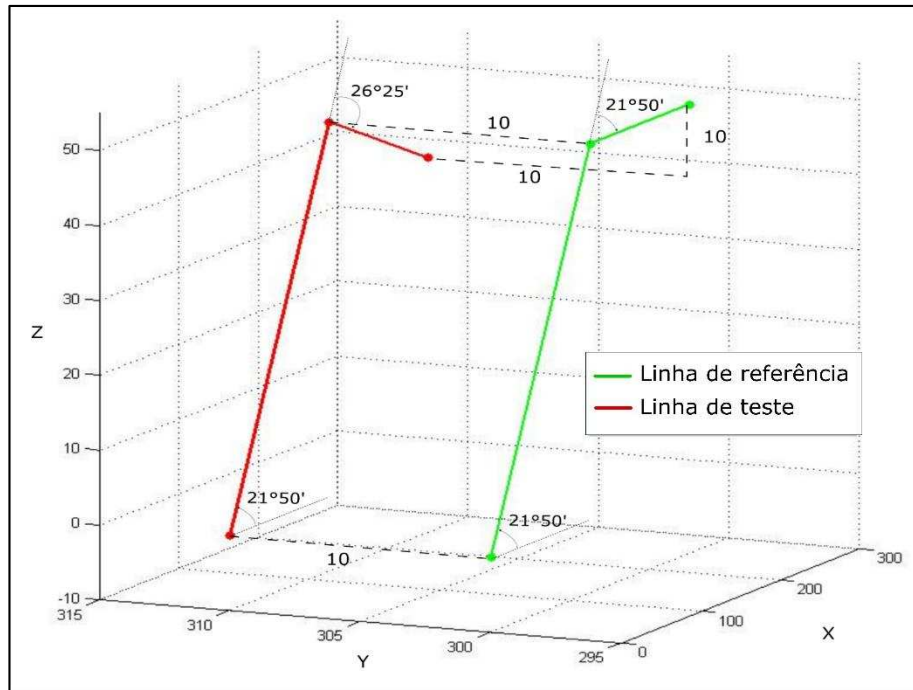


Figura 17 - Par de linhas sintéticas 5

O par de linhas número 6 (Figura 18) é similar ao número 4, a diferença está apenas no segundo segmento da linha de teste. Este que contém uma deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XY. O vértice final deste segmento se encontra na mesma posição (X, Y) do vértice final da linha de referência, porém 10 m abaixo em relação ao eixo Z.

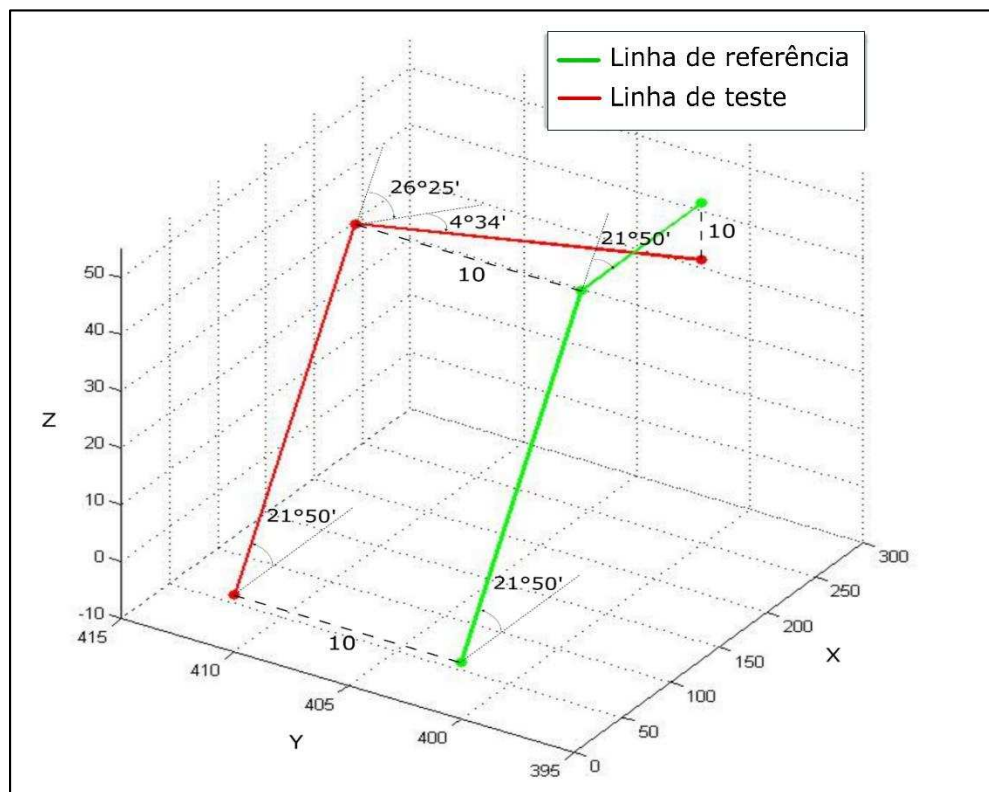


Figura 18 - Par de linhas sintéticas 6

No par de linhas sintéticas 7 (Figura 19), as linhas de teste e de referência são formadas por dois segmentos de reta. Os primeiros segmentos da linha de teste e referência são iguais aos descritos nos pares de linhas 5 e 6.

O segundo segmento da linha de referência tem aproximadamente 135 m e uma deflexão de $43^{\circ}40'$ no plano XZ, de maneira que o vértice final deste segmento se encontre a 50 m abaixo do vértice inicial (eixo Z). Na linha de teste, o comprimento do segundo segmento é de 135 m tem uma deflexão de $43^{\circ}40'$ no plano XZ e outra deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XY, de modo que o vértice final deste segmento intercepte o vértice final da linha de referência.

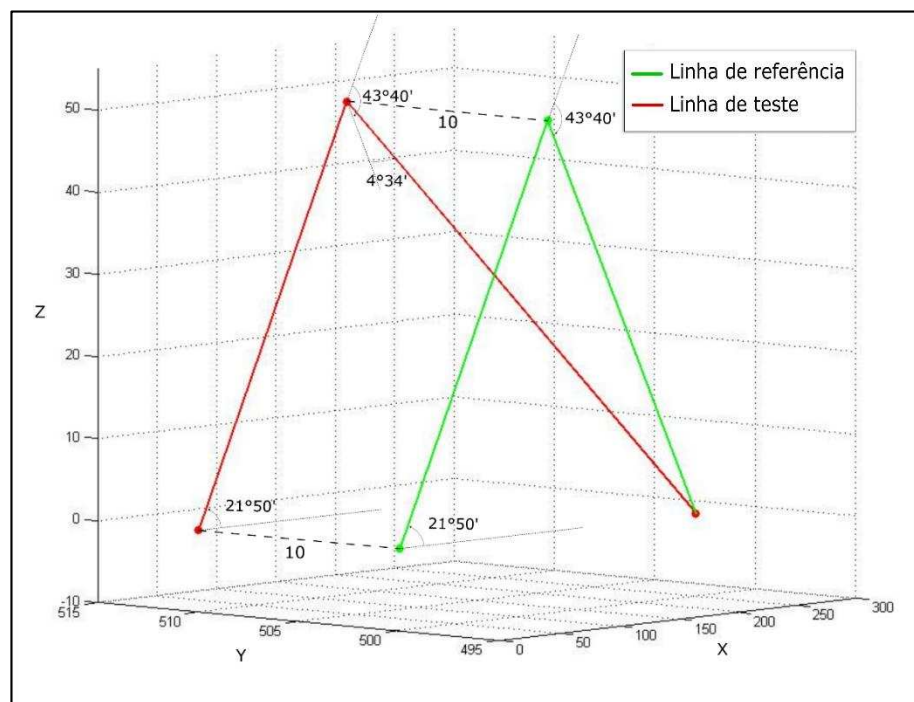


Figura 19 - Par de linhas sintética 7

No par de linhas sintéticas 8 (Figura 20), a linha de referência é formada por dois segmentos de aproximadamente 125 m. O primeiro segmento contém uma deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XZ, de forma que o vértice final deste segmento se encontre a 10 m acima do vértice inicial. No segundo segmento, há uma deflexão de $9^{\circ}8'$ no plano XZ que refaz a inclinação anterior.

A linha de teste 8 constitui-se de apenas um segmento com comprimento de aproximadamente 250 m, o vértice inicial desta linha está a 14,14 m em relação ao vértice inicial da linha de referência (distância em 3D). Esta linha teste contém uma deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XY, que faz com que seu vértice final se encontre a uma distância 3D de 14,14 m do último vértice da linha de referência, porém com direções opostas em relação ao eixo Y. Note que a linha de teste intercepta a linha de referência no seu segundo vértice.

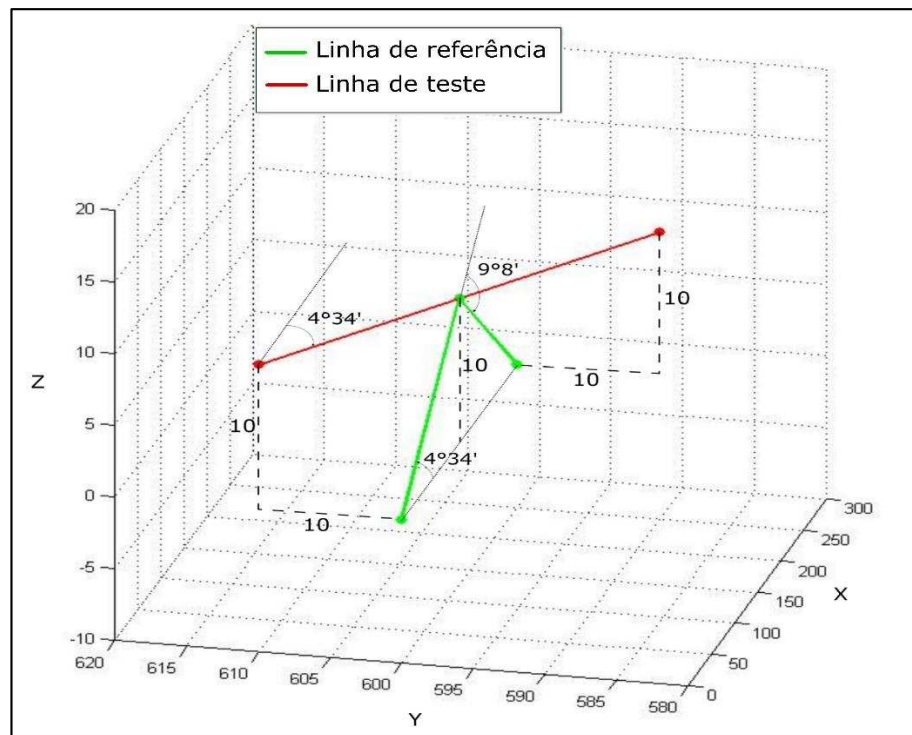


Figura 20 - Par de linhas sintéticas 8

A linha de referência 9 (Figura 21) é composta por cinco segmentos. O primeiro segmento contém aproximadamente 75 m de comprimento ao longo do eixo X. O próximo segmento possui 25 m de comprimento e uma deflexão de 315° no plano XY, o terceiro segmento é de 50 m e uma deflexão de 90° no plano XY, o quarto contém 25 m e deflexão de 90° . O último segmento tem aproximadamente 105 m e deflexão de 45° no plano XY.

A linha de teste 9 é formada por dois segmentos, no qual o primeiro segmento possui aproximadamente 125 m com uma deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XZ, de modo que o vértice final esteja a 10 m acima do vértice inicial deste segmento (eixo Z). O segundo segmento da linha de teste tem o mesmo comprimento, porém com uma rotação no eixo Y que refaz a inclinação anterior.

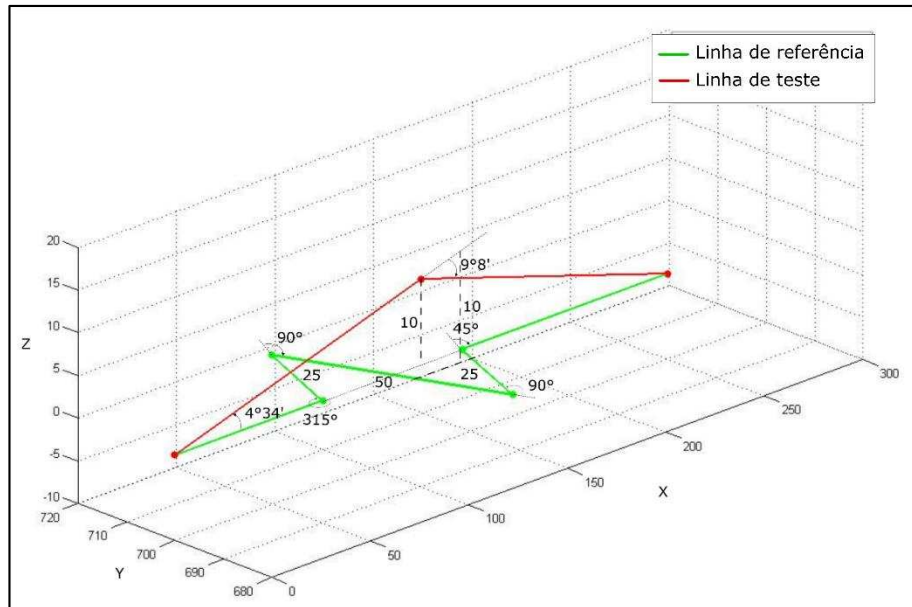


Figura 21 - Par de linhas sintéticas 9

O par de linhas sintéticas 10 (Figura 22) é semelhante ao par de linhas sintéticas 8. A diferença está na linha de teste, que desta vez, contém uma deflexão de $4^{\circ}34'$ no plano XY de maneira que o vértice inicial da linha de teste encontre-se a 10 m de distância do vértice inicial da linha de referência (em relação ao eixo Y), e o vértice final se encontre a mesma distância do vértice final da linha de referência, porém no sentido oposto. O comprimento total da linha de teste sofre um pequeno aumento para que os vértices iniciais e finais estejam alinhados em relação ao eixo Y.

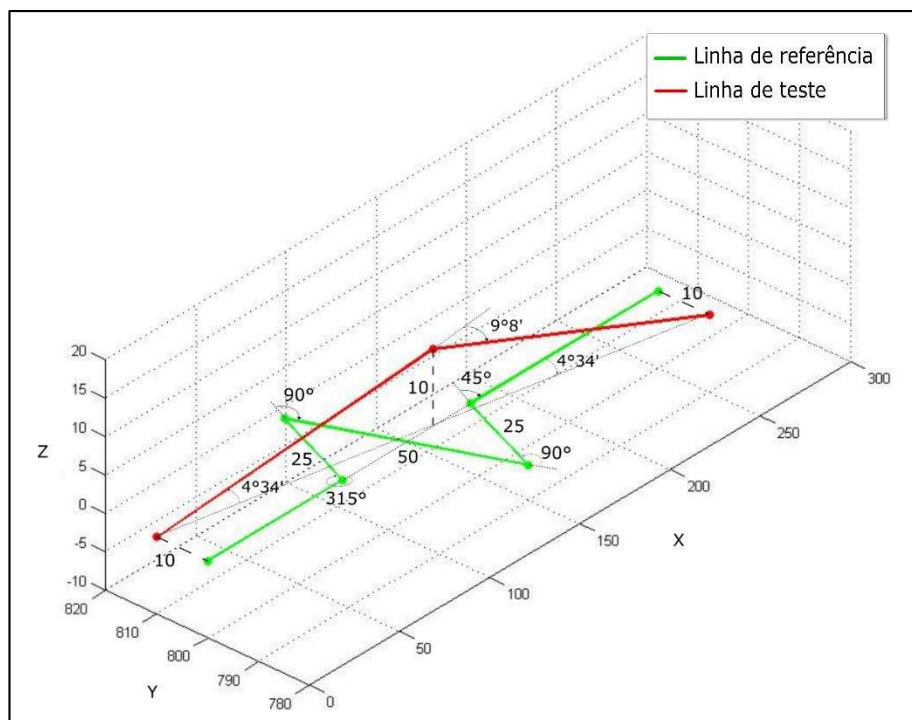


Figura 22 - Par de linhas sintéticas 9

O par de linhas sintéticas 11 (Figura 23) apresenta a mesma linha de referência utilizada nos pares 9 e 10. No entanto sua linha de teste é formada por um único segmento de linha de 250 m, no qual o vértice inicial e final da linha de teste está situado a uma distância 3D de 14,14 m dos vértices homólogos de referência (10 m em relação ao eixo Y e eixo Z).

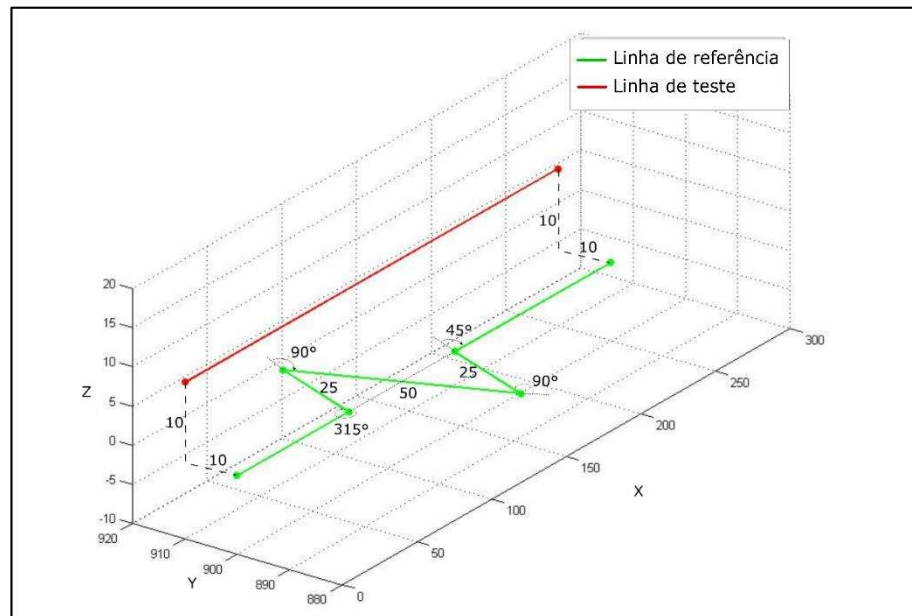


Figura 23 - Par de linhas sintéticas 11

No par de linhas sintéticas 12 (Figura 24), a linha de teste é formada por um único segmento de reta, com comprimento de aproximadamente 253 m e uma deflexão de $9^{\circ}5'$ no plano XZ. O vértice final deste segmento está situado a 40 m acima do seu primeiro vértice (eixo Z).

A linha de referência 12 é composta por cinco segmentos de reta. O seu primeiro segmento tem aproximadamente 75 m de comprimento e elevação de 10 m em relação ao seu vértice inicial. O segundo segmento tem aproximadamente 27 m com uma deflexão de 315° no plano XY e uma elevação de 10 m. O terceiro segmento tem 50 m de comprimento e deflexão de 90° no plano XY. O quarto segmento, tem comprimento de aproximadamente 39 m, com uma deflexão de 90° no plano XY, e uma elevação de 30 m. O último segmento tem 104 m de comprimento, com uma deflexão de 45° no plano XY, porém o vértice final deste segmento está 10 m abaixo (em relação ao eixo Z) de seu vértice inicial.

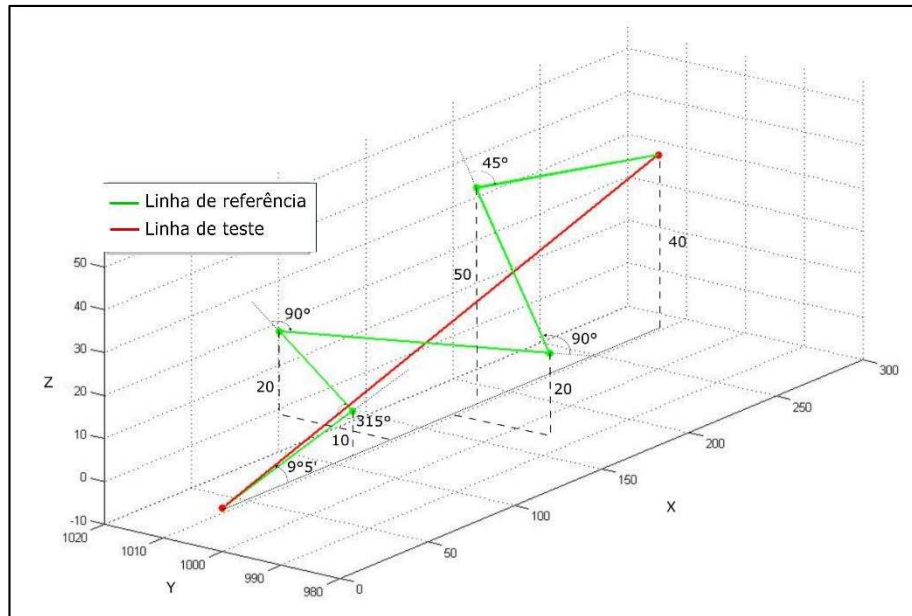


Figura 24 - Par de linhas sintéticas 12

Por fim, no par de linhas sintética 13 (Figura 25), a linha de referência 12 é igual à linha de referência apresentada no par de linhas 11. A linha de teste é formada por um segmento de reta de aproximadamente 253 m, com uma deflexão de $9^{\circ}5'$ no plano XZ e outra de $4^{\circ}34'$ no plano XY. O primeiro e último vértice da linha de teste se encontram a 10 m de distância do primeiro e último vértice da linha de referência.

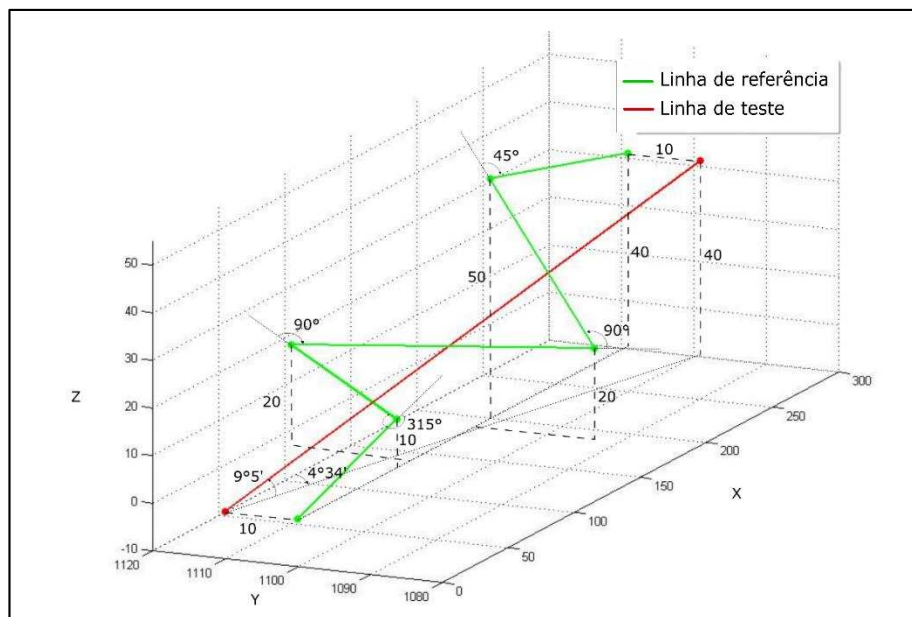


Figura 25 - Par de linhas sintéticas 13

Foram aplicados os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D neste conjunto de linhas sintéticas. Nos métodos da distância de Hausdorff 3D e influência do vértice 3D, realizou-se uma densificação nos vértices das linhas sintéticas avaliadas (Figura 26),

no qual as linhas resultantes possuíam vértices a cada dez metros. Portanto aplicou-se as metodologias segundo as Seções 2.4.1 e 2.4.2, obtendo-se discrepâncias 3D para as linhas não densificadas e densificadas.

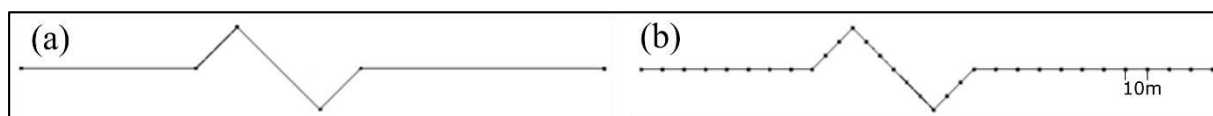


Figura 26 - (a) Exemplo dos vértices de uma linha sintética (b) Exemplo dos vértices de uma linha sintética densificada

Para o método da banda ϵ 3D aplicou-se a metodologia descrita na Seção 2.4.3, no qual se realizou uma triangulação entre as linhas homólogas de teste e referência, calculando-se o valor da área contida entre estas linhas e posteriormente obtendo discrepâncias 3D.

Nos métodos que utilizam medidas de *buffer* 3D (*buffer* simples 3D e *buffer* duplo 3D), aplicou-se a metodologia descrita nas Seções 2.4.4 e 2.4.5 para diferentes larguras de *buffer*: 5, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 e 24 m. Assim, para o método do *buffer* simples 3D, avaliou-se o percentual de inclusão da linha de teste no *buffer* de referência à medida que se altera a largura do *buffer*.

No *buffer* duplo 3D analisou-se o comportamento de cada um dos pares de linhas, por meio da normalização dos volumes obtidos, o que permitiu estimar valores de discrepância 3D por meio das Equações 19 e 21, para cada largura de *buffer* aplicada.

3.2 Experimento com dados reais

3.2.1 Área de estudo e materiais utilizados

A área de estudo representa uma área de 180 km², localizada entre os municípios de Nova Lima e Rio Acima, no Estado de Minas Gerais, contendo a sub-bacia do Ribeirão dos Macacos, integrante da bacia hidrográfica do Rio São Francisco (Figura 27). A área de estudo contém valores de altitudes entre 710 e 1540 metros, delimitada pelas latitudes 20°00'38" S e 20°07'05" S, e longitudes 43°57'28" W e 43°48'49" W.

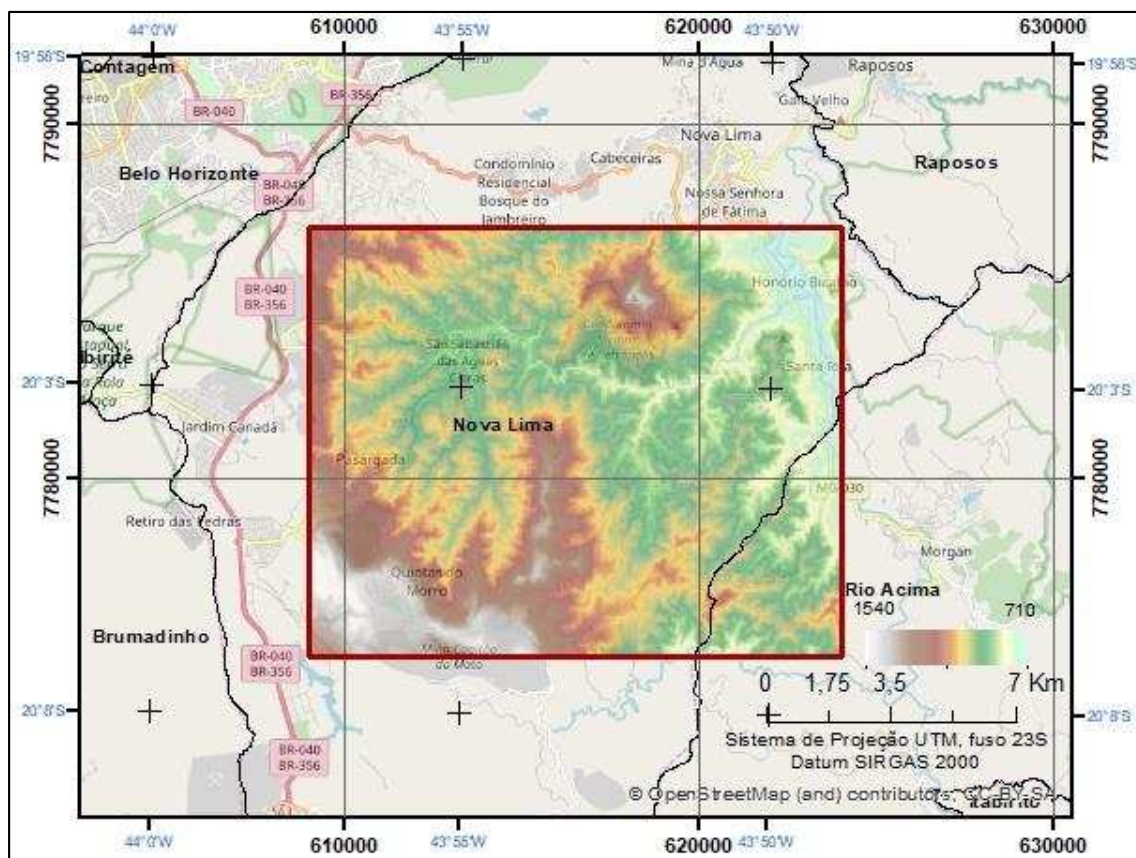


Figura 27 - Área de estudo, localizada nos municípios de Nova Lima e Rio Acima – MG

O Ribeirão dos Macacos é um dos afluentes do Rio das Velhas, que desagua no Rio São Francisco. A região de estudo representa uma área de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, o qual é formado por importantes mananciais de água potável que abastecem a cidade de Nova Lima e a região metropolitana de Belo Horizonte (BARBOSA, 2011).

O MDS utilizado para extrair as feições de teste, SRTM, é um produto gerado por meio de uma missão espacial realizada em conjunto pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, representado pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), a Agência Espacial Alemã (DLR) e Agência Espacial Italiana (ASI), durante o mês de fevereiro de 2000. Foram utilizados dois radares de abertura sintética (SAR) por interferometria (InSAR), no qual um dos sistemas continha a banda X. O levantamento foi referenciado ao sistema geodésico WGS84 utilizando-se do modelo geoidal EGM96 para representação da altitude ortométrica no modelo. O MDS SRTM tem resolução espacial de 1 segundo de arco (cerca de 30 m no equador), com especificações técnicas para atingir uma acurácia horizontal e vertical de 20 e 16 metros respectivamente (RODRIGUEZ et al., 2005).

O MDS de referência utilizado obtido por meio de aerofotogrametria digital e cedido pelo Instituto de Geoinformação e Tecnologia do Estado de Minas Gerais (IGTEC) contém resolução espacial de 1,2 metros, referenciado ao sistema geodésico SIRGAS2000, utilizando o modelo MAPGEO2010 para representação da altitude ortométrica.

3.2.2 Metodologia

Este experimento consistiu-se no emprego das metodologias de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares, aplicadas a um conjunto de dados reais. Para validação dos resultados aplicou-se a metodologia de avaliação da acurácia posicional 3D que utiliza feições pontuais, desenvolvida por Santos (2015), descrita no Seção 2.3. As etapas empregadas neste experimento podem ser descritas segundo o fluxograma a seguir (Figura 28):

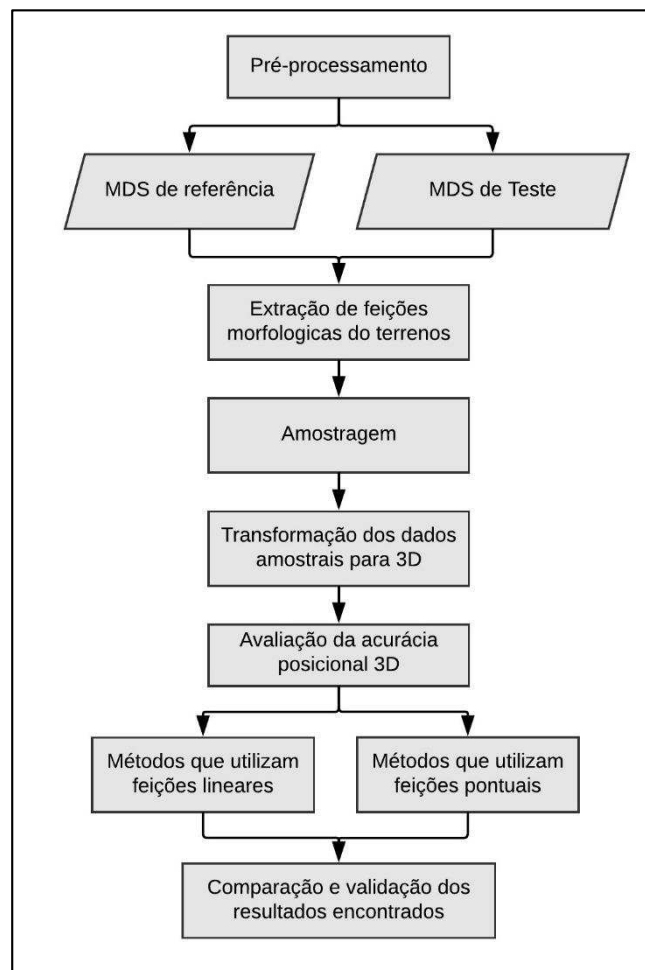


Figura 28 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no experimento com dados reais

A primeira etapa consistiu no pré-processamento dos MDSs, no qual se realizou a uniformização dos referenciais espaciais dos MDSs usados. Isso foi necessário uma vez que ambos os MDSs utilizaram modelos geoidais diferentes para representação da altitude ortométrica. Dessa forma, as altitudes ortométricas dos MDSs de teste e referência foram convertidas para altitude elipsoidais por meio da metodologia proposta por Santos et al. (2016).

Após a etapa de pré-processamento, realizou-se a extração de feições morfológicas do terreno, com base na metodologia desenvolvida por Santos et al. (2016). Tal metodologia consistiu na extração de linhas de cumeada e hidrografia numérica². Obteve-se também, pontos de interseções das linhas de cumeada e pontos de confluência da hidrografia numérica.

O processo utilizado para extração das feições nos modelos é exemplificado na Figura 29. Primeiramente verificou-se a presença de depressões espúrias nos MDSs. Para isso, obteve-se a direção de fluxo dos modelos por meio do algoritmo das oito direções (D8). Este algoritmo estabelece a direção de fluxo para cada célula de um modelo por meio de análise de uma janela móvel de tamanho 3×3 *pixels*, no qual, considera-se a maior inclinação de seus vizinhos (FERNÁNDEZ et al., 2012). Com a direção da célula da qual resulta a maior inclinação, atribui-se um valor numérico à célula analisada. Logo, a imagem resultante da aplicação da direção de fluxo deve apresentar no máximo oito valores numéricos distintos, caso contrário, o modelo analisado não é consistente e é necessária a correção das depressões espúrias. A correção destas células é feita por meio do preenchimento destas, de maneira que o fluxo do modelo consiga escoar à foz de sua bacia hidrográfica.

² Este termo refere-se a um conjunto de linhas que definem a drenagem numérica derivada de MDE/MDS. Assim, estas linhas representam os locais preferenciais de escoamento das águas superficiais.

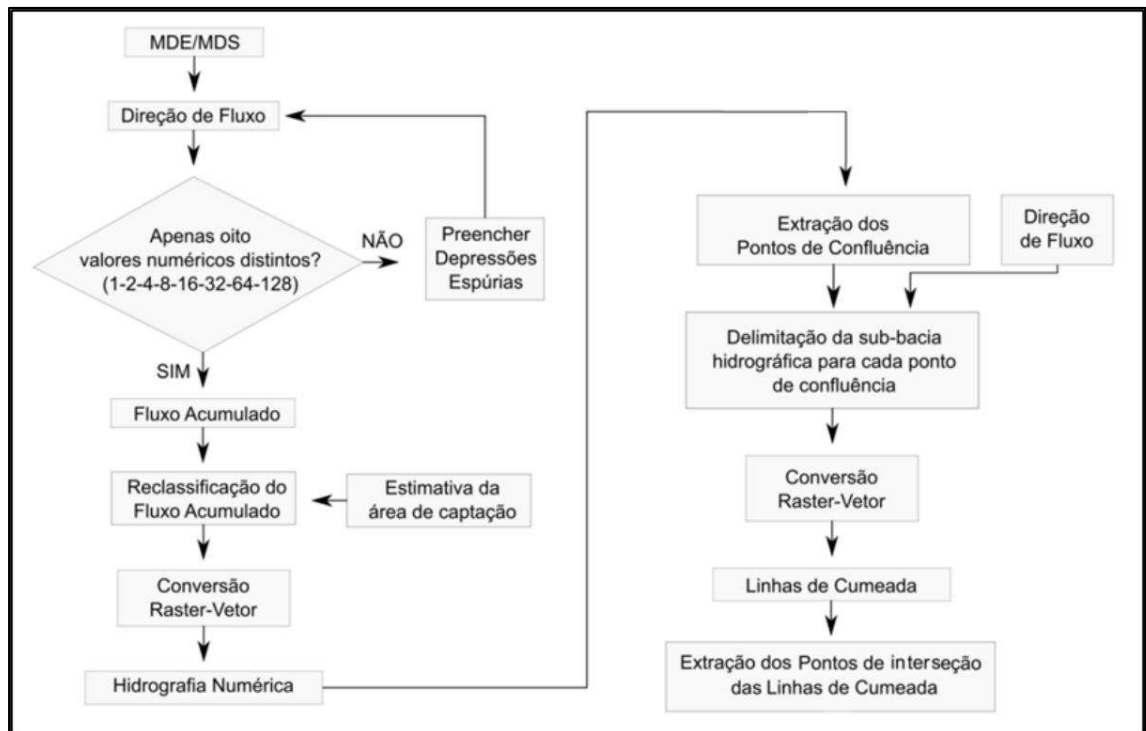


Figura 29 - Metodologia para extração de feições morfológicas do terreno a partir de um MDE/MDS. Fonte: Santos et al. (2016), adaptado pelo autor.

Com o modelo consistente, obtém-se novamente a direção de fluxo. Em seguida, foi calculado o fluxo acumulado para cada célula do modelo. Como resultado, é gerada uma imagem no qual o valor de cada célula corresponde à quantidade de células a montante que contribui com o escoamento que passa na célula em análise.

Após, realizou-se a reclassificação do fluxo acumulado. Para este procedimento é necessário estimar a área de captação das bacias. Santos et al. (2016) realizaram estudos da hidrografia presente na área de estudo e verificou-se que os cursos d'água começam a ser formados (ou mapeados) em torno de 10 ha da área de contribuição. Logo, como os MDSs de teste e referência tem resolução espacial de 30 e 1,2 metros respectivamente, para que uma célula nos modelos seja considerada como curso d'água, o valor de fluxo acumulado desta deveria ser igual ou maior que 112 *pixels* para o modelo de teste e 69.445 *pixels* para o modelo de referência.

Feito a reclassificação do fluxo acumulado, converteu-se as células consideradas como curso d'água para formato vetorial e obteve-se a hidrográfica numérica. Para obter os pontos de confluência, extraíram-se os vértices finais de cada trecho da hidrografia numérica.

Com os pontos de confluência, calculou-se a bacia de acumulação e obteve-se a delimitação das bacias de acumulação. O limite das bacias de acumulação foi convertido

para formato vetorial e representa as linhas de cumeada. Por fim, realizou-se a interseção entre as linhas de cumeada para obter os pontos de interseção das linhas de cumeada.

Obtidas as feições morfológicas do terreno para os MDSs de teste e referência, selecionou-se a amostra de pontos e linhas para aplicar os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D. Para tal, gerou-se uma malha de 4 linhas e 5 colunas, no qual selecionou uma linha de hidrografia e cumeada para cada quadrante. Alguns cuidados foram tomados na seleção da amostra, como: selecionar trechos de comprimento variado, não selecionar trechos em que houvesse a presença de massas d'água, como rios, lagos ou represas, selecionar trechos que continham pontos de confluência ou interseções de linhas de cumeada bem definidas nos modelos de superfície.

Logo, para os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares foram coletados 20 linhas de hidrografia numérica e 20 linhas de cumeada em cada MDS. Para metodologia baseada em pontos, coletou-se 20 pontos de confluência e 20 de interseção de linhas de cumeada. Todos os pontos coletados pertencem ao conjunto de linhas utilizadas. A distribuição das linhas e pontos homólogos utilizados pode ser visto na Figura 30. As feições que representam a hidrografia numérica estão numeradas de 1 a 20, enquanto as feições de cumeada estão numeradas de 21 a 40.

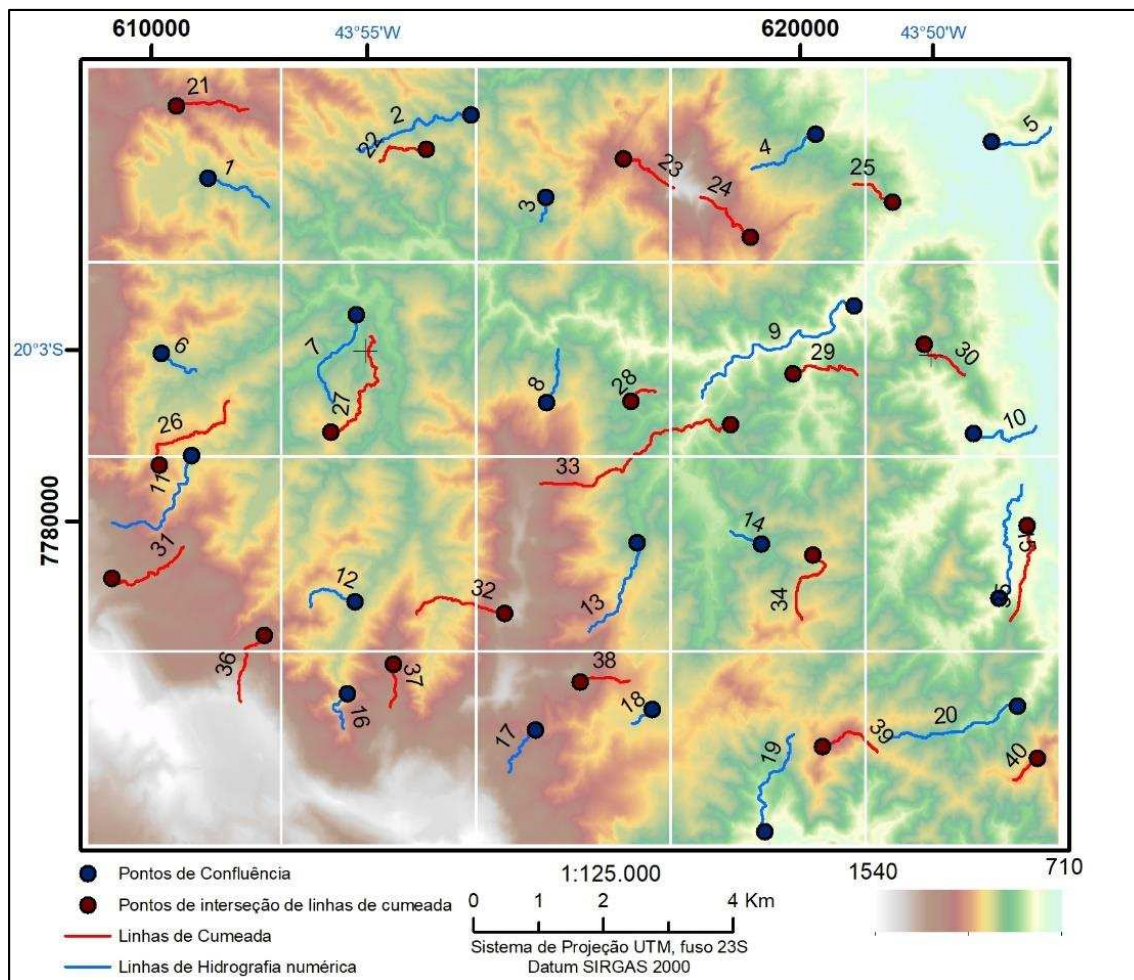


Figura 30 - Feições lineares e pontuais utilizadas na avaliação da acurácia posicional 3D

Selecionada as amostras de pontos e linhas, necessitou-se transformar o conjunto de dados 2D para 3D, uma vez que a metodologia desenvolvida por Santos et al. (2016) para extração de feições resulta em pontos e linhas em 2D. Para o conjunto de pontos, este processo é mais simples, basta apenas extrair o valor da cota presente no pixel do modelo correspondente para cada ponto avaliado.

Na amostra de linhas, realizou-se um processo de densificação, de forma que a distância de cada vértice da linha correspondesse à resolução espacial de seu respectivo modelo. Logo, para o conjunto de linhas de referência, a densificação foi de 1,2 m, enquanto para os dados de teste foi de 30 m. Em seguida, o conjunto de linhas foi transformado em pontos, no qual se extraiu a cota do modelo para cada ponto da linha e então realizou a construção de cada segmento em 3D até formar as linhas em 3D.

Para a avaliação da acurácia posicional 3D por meio de feições pontuais, aplicou-se a metodologia descrita na Seção 2.3 desenvolvida por Santos (2015). Basicamente, com as coordenadas (X, Y, Z) dos pontos de teste e referência, calculou-se as

discrepâncias planimétricas (d_{i2D}), altimétrica (d_{iZ}) e tridimensional (d_{i3D}). Em seguida, calculou-se o PEC_{3D} e EP_{3D} para a escala de 1:100.000, considerando a covariância entre as discrepâncias planimétrica e altimétrica para avaliação do produto utilizando o Decreto n° 89.817. Por fim, classificou-se o produto nas classes definidas pelo Decreto n° 89.817 para a escala de 1:100.000.

Para o conjunto de linhas, aplicaram-se os métodos em 3D da distância de Hausdorff, influência do vértice, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo, segundo as metodologias descritas nas seções 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4 e 2.4.5, respectivamente.

Nos métodos que utilizam *buffer* foi necessário definir uma largura de *buffer* para ser aplicado a todo o conjunto de dados avaliado. Realizou-se o mesmo processo de iteração utilizado no experimento com linhas sintéticas, porém constatou-se que para cada par de linhas avaliado, existe uma largura de *buffer* diferente. Neste caso, como se trata da avaliação de um MDS, sendo que, todo conjunto de dados de teste é proveniente do mesmo modelo, necessitou-se aplicar uma única largura de *buffer* para que fosse possível inferir a qualidade posicional deste MDS.

Devido à ausência de normas que regulamentam os métodos de avaliação da acurácia posicional 3D, utilizou-se as tolerâncias do Decreto n° 89.817 como base para definir tolerâncias 3D aplicadas as feições lineares. Vale ressaltar que as tolerâncias definidas pelo Decreto n° 89.817 não foram desenvolvidas para métodos de avaliação que utilizam feições lineares, e que esta medida proposta necessita de mais estudos para que seja possível utilizá-la para classificar um dado espacial por estes métodos de avaliação.

Deste modo, utilizou os valores de PEC e EP para escala de 1:100.000 para planimetria e altimetria (equidistância vertical correspondente a 50 m) e calculou-se a resultante tridimensional para o PEC e EP planimétrico e altimétrico (Tabela 3).

Tabela 3 - Tolerâncias planimétricas e altimétricas segundo Decreto n° 89.817. Tolerância tridimensional obtida por meio do cálculo da resultante entre planimetria e altimetria para a escala de 1:100.000

Classe	Planimetria		Altimetria		Tridimensional	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	50	30	25	16,5	55	34
B	80	50	30	20	85	53
C	100	60	37,5	25	106	65

Com os valores de PEC_{3D} e EP_{3D} definidos, associou-se estes valores as condições descritas pelo Decreto n° 89.817 para classificar o produto avaliado por feições lineares quanto as tolerâncias 3D propostas.

Portanto, para avaliar um dado espacial quanto à acurácia posicional 3D por feições lineares é necessário atender a duas condições:

- I. Noventa por cento (90%) das linhas planialtimétricas de checagem quando comparadas a um dado de referência deverão apresentar valores de discrepâncias tridimensionais (d_{i3D}) menores ou iguais aos valores do PEC_{3D} definido para a classe e escala testada.
- II. Da amostra de d_{i3D} , os valores de RMS obtidos deverão apresentar valor menor ou igual ao erro padrão 3D (EP_{3D}) definido para cada ponto de checagem

Após definir essas tolerâncias 3D, utilizou-se o valor do PEC_{3D} para a classe A como largura do *buffer* e calculou-se o percentual de inclusão da linha de teste no sólido de referência para o método do *buffer* simples 3D. Para o *buffer* duplo 3D, utilizou-se a Equação 21, proposta neste trabalho, para o cálculo de discrepância 3D. Por fim, analisou-se as discrepâncias 3D obtidas pelos métodos que utilizam feições lineares e classificou-os quanto as condições estabelecidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos realizados neste trabalho. Considerando os dados simulados primeiramente, e após os resultados com dados reais.

4.1 Experimento com dados simulados

Como resultado deste experimento, obtiveram-se discrepâncias 3D para o conjunto de linhas simuladas por meio da aplicação das metodologias de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares.

A Figura 31 mostra os resultados encontrados segundo o método da distância de Hausdorff 3D, para o conjunto de dados sintéticos e para os dados sintéticos densificados. Para o primeiro conjunto de dados, os maiores valores de discrepância 3D foram para os pares de linhas 1, 2, 3, 4, 8, 11 e 13 e os menores valores nos pares de linhas 7 e 9.

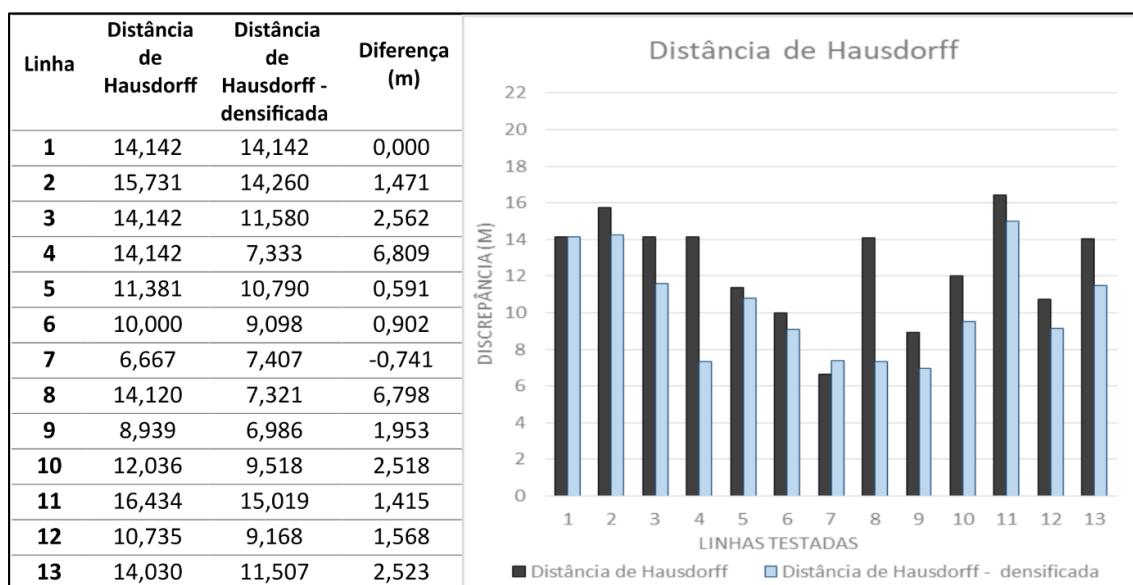


Figura 31 - Discrepâncias obtidas pelo método da distância de Hausdorff 3D para o conjunto de linha sintéticas e o conjunto de linhas sintéticas densificadas

Para o conjunto de dados densificados, os resultados mostram que os maiores valores de discrepância 3D foram nos pares de linhas 1, 2 e 11, e os menores nos pares de linhas 4, 7, 8 e 9. Para a maioria das linhas densificadas, obteve-se discrepâncias menores, chegando-se a uma diferença de aproximadamente 7 m, nos pares de linhas 4 e 8.

Os resultados encontrados para o método da influência do vértice 3D são apresentados na Figura 32. Similar ao método da distância de Hausdorff 3D, obteve-se as discrepâncias 3D para o conjunto de linhas sintéticas e para o conjunto de linhas sintéticas densificadas.

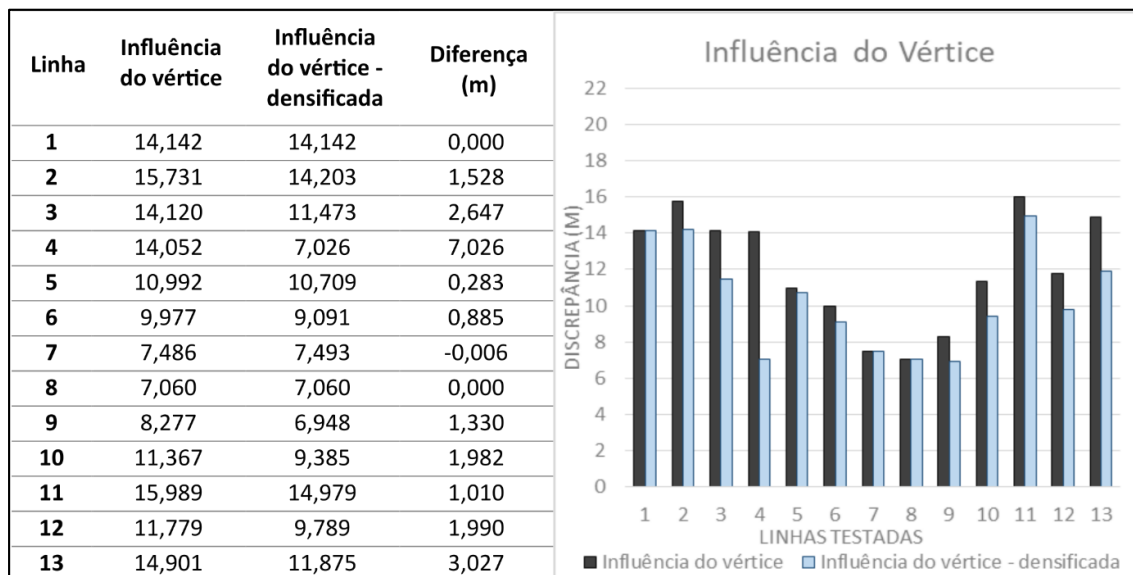


Figura 32 - Discrepâncias obtidas pelo método da influência do vértice 3D para o conjunto de linha sintéticas e o conjunto de linhas sintéticas densificadas

Os resultados mostram que para o conjunto de linhas sintéticas os maiores valores de discrepâncias 3D foram obtidos nas linhas 1, 2, 3, 4, 11 e 13, enquanto que os menores foram para as linhas 7, 8 e 9. Por outro lado, no conjunto de dados densificados, os maiores valores de discrepâncias 3D foram nas linhas 1, 2 e 11, e os menores valores para as linhas 4, 7, 8 e 9. Semelhante ao método anterior, para a maioria das linhas sintéticas os valores de discrepância foram menores ao se densificar, tal diferença alcançou 7 m para o par de linhas 3.

A Figura 33 mostra uma análise conjunta destas metodologias. No conjunto de dados originais, notou-se valores de discrepâncias relativamente próximos, exceto no par de linhas 8, que a diferença entra o método da distância de Hausdorff e influência do vértice alcançou cerca de 7 m.

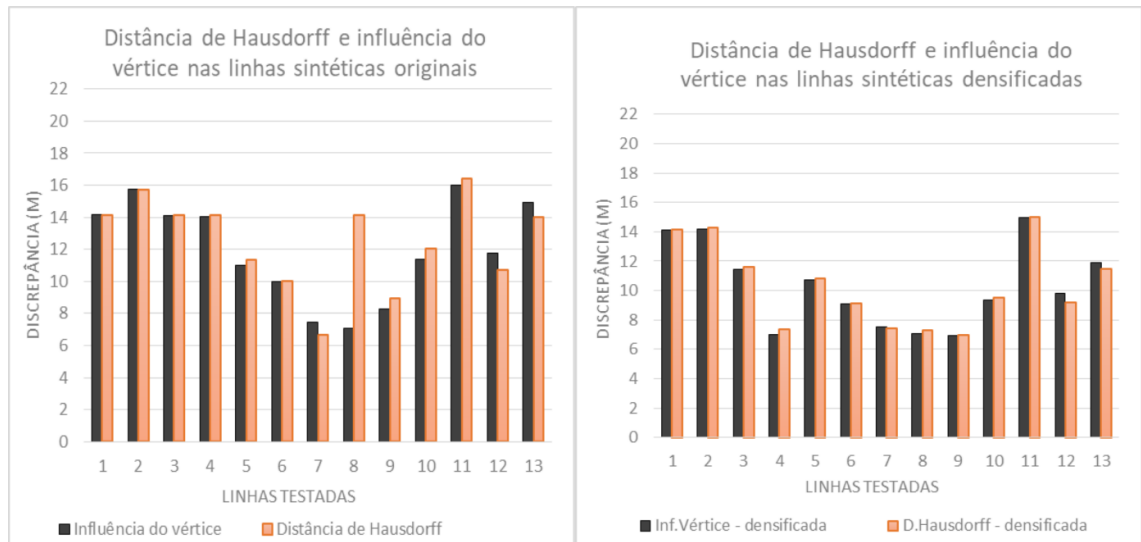


Figura 33 - Comparação entre os métodos da distância de Hausdorff e Influência do vértice 3D para o conjunto de linhas sintéticas originais e para as linhas densificadas

Para as duas metodologias, observou-se que ao se densificar as linhas, houve uma redução nos valores de discrepância. Dessa forma, verifica-se que ambos os métodos são sensíveis à quantidade de vértices, uma vez que os métodos da distância de Hausdorff e influência do vértice têm como princípio básico medidas de distância a partir de seus vértices.

Apesar dos dois métodos sofrerem interferência quanto à quantidade de vértices, verificou-se que o método da influência do vértice foi menos afetado, resultando em diferenças menores quando comparado aos resultados obtidos pela distância de Hausdorff.

Para o método da banda ϵ 3D os resultados de discrepância 3D encontrados podem ser vistos na Figura 34. Como este método se baseia na área formada entre as feições homólogas, o mesmo não sofre influência quanto ao número de vértices. Portanto, para este método utilizou-se apenas o conjunto de linhas sintéticas originais. Os maiores valores de discrepância 3D encontrados foram nos pares de linhas 1, 2 e 11 e os menores os pares de linhas 4, 7, 8 e 9. Esta análise mostra resultados similares aos métodos da distância de Hausdorff e influência do vértice aplicados ao conjunto de linhas sintéticas densificadas.

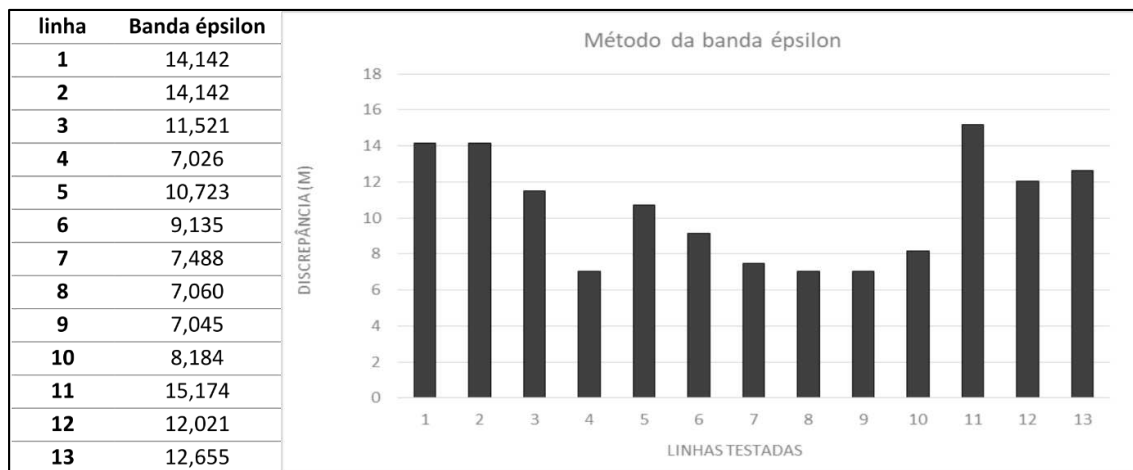


Figura 34 - Discrepâncias obtidas pelo método da banda épsilon 3D

Nos métodos que utilizam medidas de *buffer*, foi necessário encontrar o valor de largura de *buffer* correspondente para cada par de linhas sintética, uma vez que as linhas contêm discrepâncias diferentes e devem ser analisadas separadamente. Assim, aplicou-se diferentes larguras de *buffer* para cada par de linhas analisado. No total, realizaram-se dez iterações, com valores de 5 m até 24 m.

Ao realizar este processo para o método do *buffer* simples 3D, analisou-se a porcentagem de inclusão da linha de teste para cada sólido de referência gerado por meio da variação da largura do *buffer*. Os resultados do *buffer* simples 3D são apresentados na Figura 35.

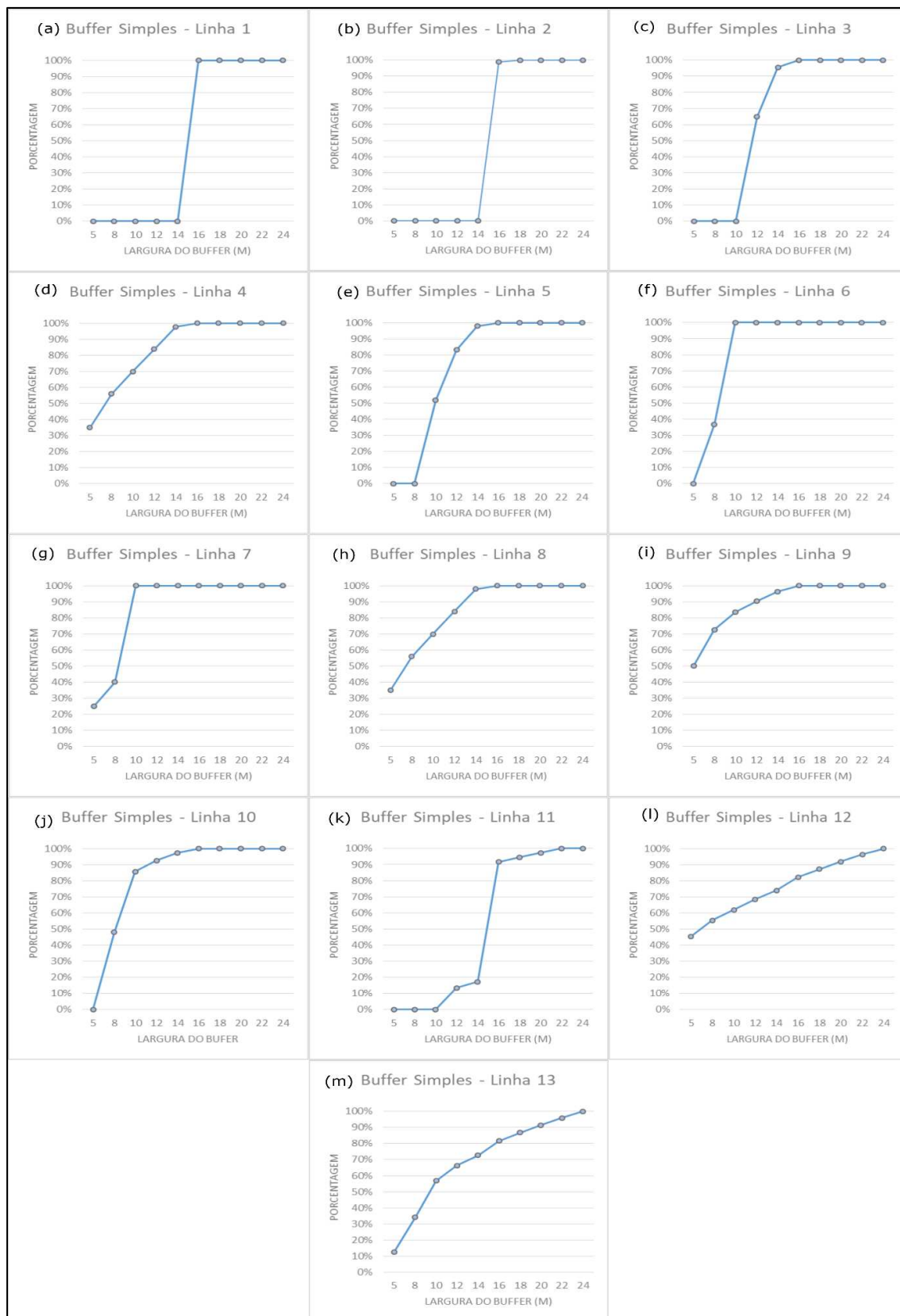


Figura 35 - Método do *buffer* simples 3D aplicado ao conjunto de linhas sintéticas. Gráficos do percentual de inclusão da linha de teste no sólido de referência para os pares de linhas 1 a 13

Ao analisar a Figura 35, é possível inferir acerca do comportamento da linha de teste em relação ao *buffer* de referência. Por exemplo, no par de linhas 1 (Figura 35 a), é possível verificar o paralelismo entre a linha de teste e a linha de referência por meio do

comportamento da linha do gráfico, que passa de 0% para 100% em uma variação muito pequena na largura do *buffer*. Nos demais pares de linhas, não se constata o mesmo comportamento, por se tratar de linhas com formas geométricas mais complexas.

Considerando uma porcentagem de inclusão da linha de teste de 90 e 95% (GOODCHILD E HUNTER,1997), pode-se obter a discrepância relativa de cada linha por meio da largura do *buffer* (Figura 36). Os resultados mostram que os maiores valores de discrepâncias 3D para 90 e 95% foram nas linhas 11, 12 e 13, e os menores valores foram nos pares de linhas 6 e 7.

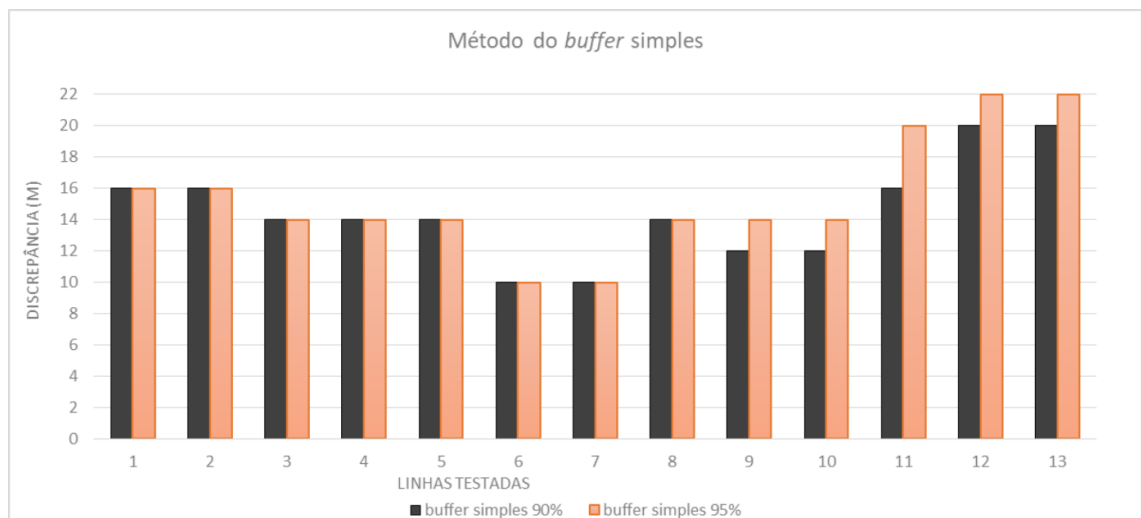


Figura 36 - Discrepâncias relativas obtidas por meio do método do *buffer* simples

Para o método do *buffer* duplo 3D, aplicou-se o mesmo processo iterativo utilizado no *buffer* simples. Após este procedimento, realizou-se a normalização dos volumes obtidos por meio das operações de sobreposição entre os volumes de referência e teste. O processo de normalização possibilita obter a largura ideal do *buffer* para cada par de linhas analisado. A Figura 37 mostra o resultado da normalização destes volumes para cada par de linhas sintética avaliada.

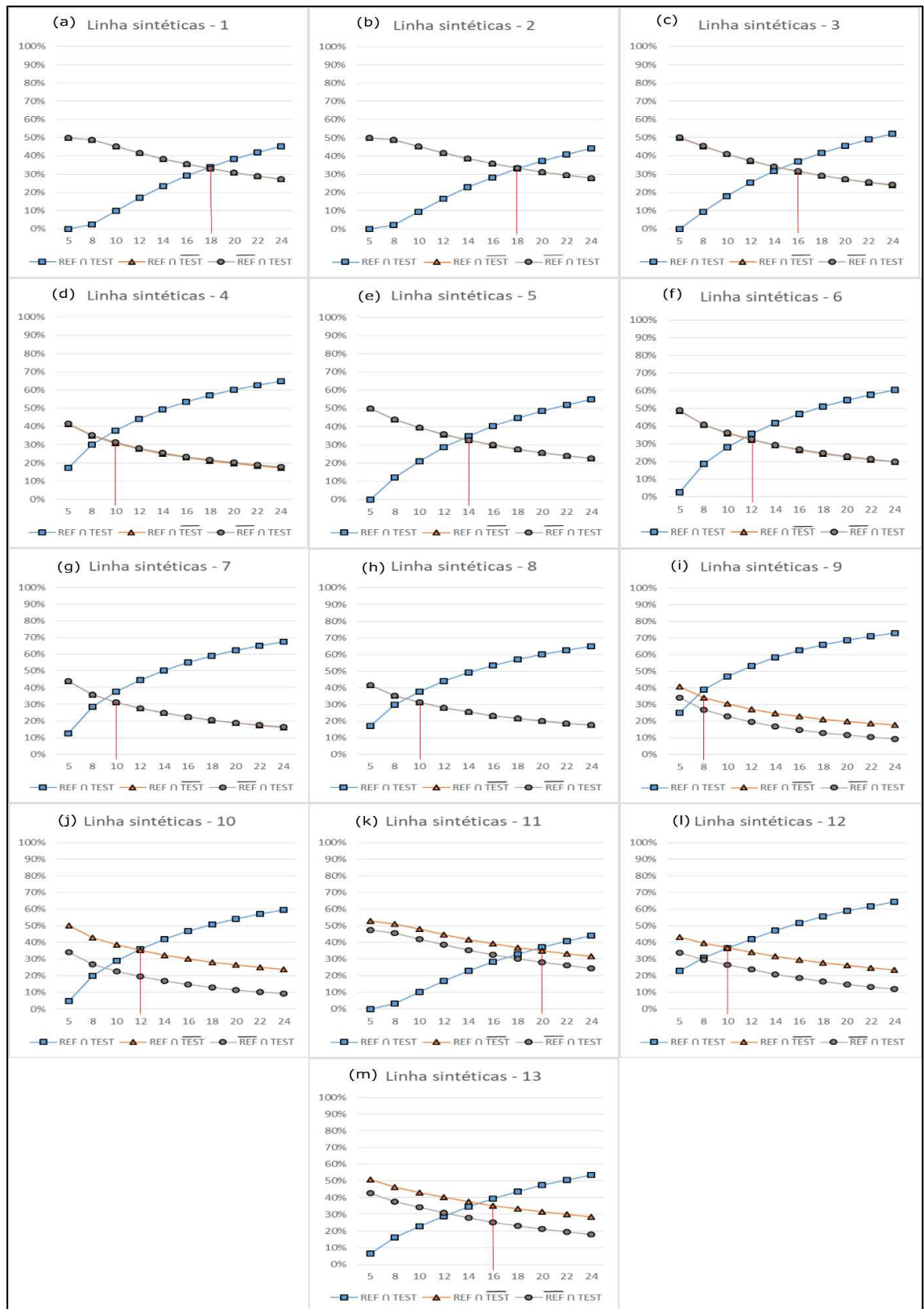


Figura 37 - Normalização dos volumes de teste e referência para o conjunto de linhas sintéticas testadas. O termo $REF \cap TEST$ refere-se ao volume formado entre a interseção dos volumes de teste e referência. $REF \cap \overline{TEST}$ faz referência ao volume contido na região de referência e não contido no teste. $\overline{REF} \cap TEST$ refere-se ao volume que não está contido na referência e contido no teste.

De acordo com a Figura 37, observa-se que para cada par de linhas homólogas, o ponto de interseção entre os volumes normalizados ocorre em diferentes larguras de *buffer*. Por exemplo, o ponto de interseção na linha 6 ocorre para uma largura de *buffer*

de aproximadamente 12 m, enquanto na linha 8 ocorre na largura de 10 m. Em alguns casos, as linhas $REF \cap \overline{TEST}$ e $\overline{REF} \cap TEST$ do gráfico não coincidem (i, j, k, l, m), uma vez que o comprimento da linha de teste e referência são diferentes. Para estes casos, utilizou-se o maior valor de interseção com a linha $REF \cap TEST$ como largura ideal.

A Tabela 4 mostra os valores de discrepância 3D obtidos pela Equação 19 proposta por La Vega et al. (2016). Vale ressaltar que Equação 19 resulta em valores de discrepância em m² (metros ao quadrado) impossibilitando a posterior comparação com os métodos utilizados anteriormente.

Tabela 4 - Discrepâncias 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 19

Discrepâncias 3D (m ²)										
ID	5m	8m	10m	12m	14m	16m	18m	20m	22m	24m
1	123,4	301,4	405,5	503,8	599,7	694,5	788,7	882,6	976,3	1069,9
2	123,4	301,9	407,8	508,7	607,6	705,8	803,8	901,8	1000,0	1098,5
3	123	261,1	342,3	421,5	499,9	578,2	656,4	734,8	813,4	892,4
4	86,5	169	220,9	272,7	324,9	377,7	431,2	485,5	540,5	596,2
5	123,2	247,5	321,7	394,2	466,2	537,9	609,5	681,2	753,1	825,1
6	117	215,7	276,9	337,3	397,3	457,2	517,2	577,2	637,3	697,5
7	96,1	175,3	223,8	271,2	318	364,4	410,3	456	501,5	546,7
8	87,3	170,7	223,4	276	329,2	383	437,7	493,1	549,5	606,7
9	84,9	163,3	214,8	266,5	319,4	373,9	430,3	488,5	548,7	611,0
10	125	237,9	312,2	387,6	465	544,8	627,1	712,1	799,9	890,5
11	137,5	329,9	453	573,8	693	812,7	933,8	1056,9	1182,2	1309,8
12	93,9	206,2	288	370,6	451,7	533,2	616,3	701,5	789	879,0
13	127,1	271,5	374,6	479,3	583,1	688,1	795,5	905,8	1019,1	1135,7

A Tabela 5 descreve os valores de discrepância 3D obtidos segundo a Equação 21 proposta pelo autor. Os resultados encontrados por esta equação têm unidade em metros, sendo possível compará-los aos demais métodos aplicados neste trabalho.

Tabela 5 - Discrepâncias 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 21

Discrepância Média (m)										
ID	5m	8m	10m	12m	14m	16m	18m	20m	22m	24m
1	7,85	11,99	12,91	13,36	13,64	13,82	13,95	14,05	14,12	14,19
2	7,85	12,	12,98	13,49	13,81	14,04	14,21	14,35	14,47	14,57
3	7,83	10,39	10,90	11,18	11,37	11,50	11,61	11,69	11,77	11,84
4	5,51	6,72	7,03	7,23	7,39	7,51	7,63	7,73	7,82	7,91
5	7,84	9,85	10,24	10,46	10,60	10,70	10,78	10,84	10,90	10,94
6	7,45	8,58	8,81	8,95	9,03	9,10	9,15	9,19	9,22	9,25
7	6,12	6,98	7,12	7,19	7,23	7,25	7,26	7,26	7,26	7,25
8	5,55	6,79	7,11	7,32	7,48	7,62	7,74	7,85	7,95	8,05
9	5,40	6,50	6,84	7,07	7,26	7,44	7,61	7,77	7,94	8,10
10	7,96	9,47	9,94	10,28	10,57	10,84	11,09	11,33	11,57	11,81
11	8,75	13,13	14,42	15,22	15,76	16,17	16,51	16,82	17,10	17,37
12	5,98	8,20	9,17	9,83	10,27	10,61	10,90	11,16	11,42	11,66
13	8,09	10,80	11,92	12,71	13,26	13,69	14,07	14,42	14,74	15,06

A partir dos resultados de discrepância média 3D obtidos pela Equação 21 e dos gráficos da normalização dos volumes (Figura 37), selecionou-se os valores de discrepância para a largura de *buffer* ideal de cada par de linhas homólogas (Figura 38). Os resultados mostram valores de discrepâncias entre 7 e 16 m, com uma configuração bem próxima dos resultados encontrados nos métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice e banda épsilon.

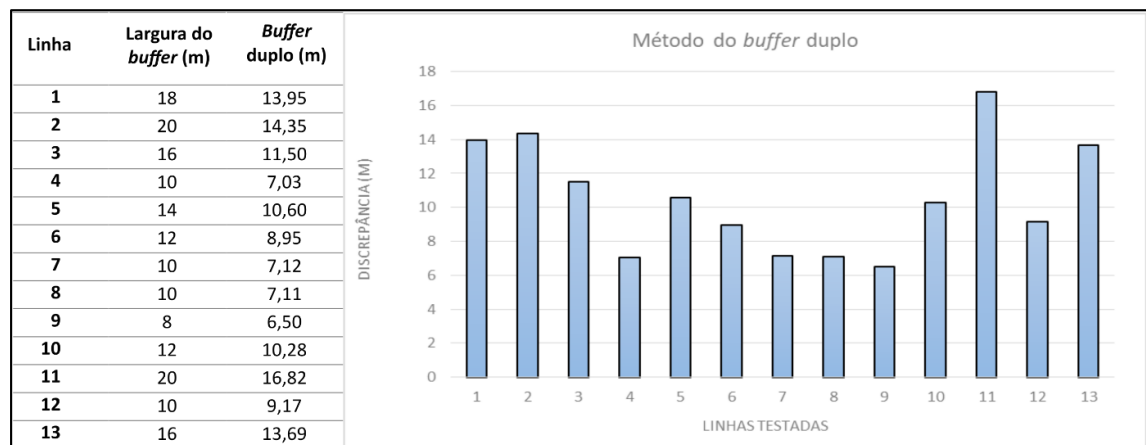


Figura 38 - Discrepâncias 3D obtidas pelo método do Buffer duplo 3D para o conjunto de linhas sintéticas, segundo Equação 21

Ao final, foram comparadas as discrepâncias obtidas pelos métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice (para o conjunto de linhas densificadas), banda épsilon, *buffer* simples (95%) e *buffer* duplo em 3D (Figura 39).

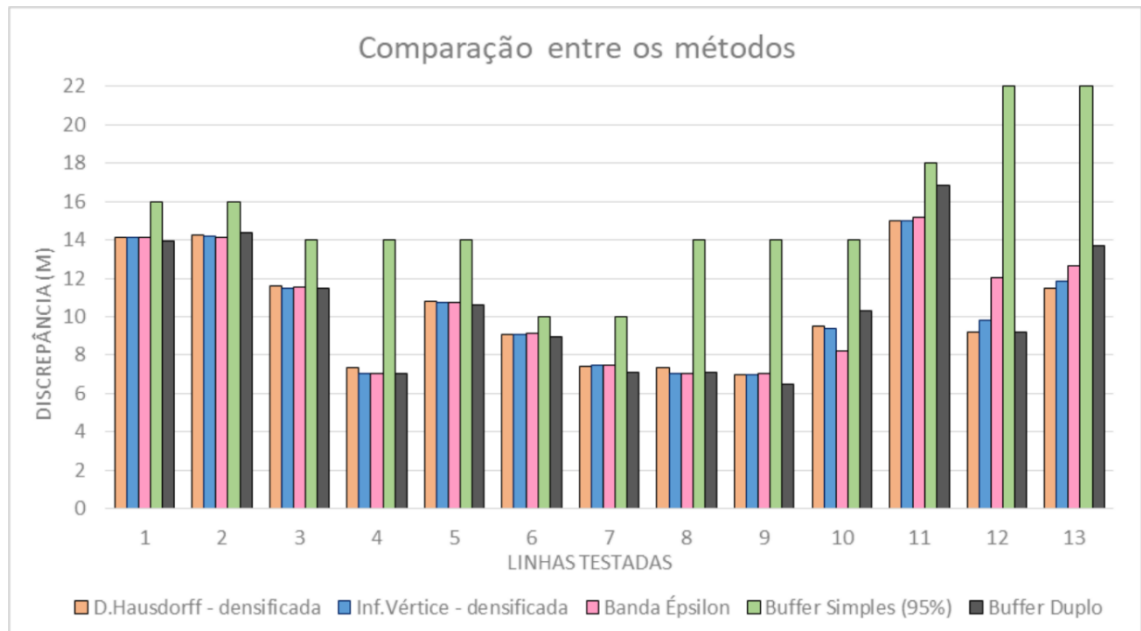


Figura 39 - Discrepâncias obtidas por diferentes métodos 3D aplicados ao conjunto de linhas sintéticas

No geral, os resultados para os métodos da influência do vértice, distância de Hausdorff e banda épsilon em 3D foram semelhantes, com exceção nas linhas 10 e 12, que a banda épsilon resultou em discrepâncias com uma diferença próxima de 2 m em relação às outras metodologias.

O método do *buffer* simples obteve os maiores valores de discrepância para todo o conjunto de linhas sintéticas. Vale ressaltar que este método calcula uma medida em porcentagem com relação à inclusão da linha de teste no sólido de referência. Logo os valores encontrados são uma estimativa da discrepância entre as linhas para um percentual de inclusão predefinido (neste caso 95%).

No método do *buffer* duplo, os resultados obtidos segundo Equação 19, proposta por La Vega et al. (2016), mostram discrepâncias 3D em metros ao quadrado, o que impossibilitou uma análise com as outras metodologias aplicadas neste trabalho. Por outro lado, os resultados apresentados pela Equação 21, quando comparado as outras metodologias, resultaram em discrepâncias muito próximas das encontradas pelos métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice e banda épsilon.

Os métodos utilizados têm como finalidade quantificar a distância entre duas feições lineares. Os dados simulados foram desenvolvidos inserindo-se incertezas entre as linhas de teste e referência, porém apenas no par de linhas 1 é possível definir exatamente sua discrepância (14,142 metros), por se tratar de duas linhas paralelas. De acordo com a Figura 39, percebe-se que os métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice e banda épsilon obtiveram o valor de 14,142 metros de discrepâncias para o

par de linhas 1, que corresponde a distância inserida neste par de linhas. Pelo *buffer* duplo o resultado foi de 13,95 metros, um pouco inferior ao valor esperado.

Apesar da divergência nos resultados encontrados, nota-se uma congruência nos valores de discrepâncias 3D (com exceção ao *buffer* simples) na maioria dos pares de linhas analisados. Apenas nos pares de linhas 10, 11, 12 e 13, que apresentam geometrias mais complexas, os valores de discrepâncias 3D foram consideravelmente distintos para cada método empregado.

4.2 Experimento com dados reais

O experimento com dados reais consistiu na avaliação da acurácia posicional 3D do MDS SRTM de resolução de 30 metros, no qual se utilizou como referência um MDS obtido por meio de aerofotogrametria. As feições lineares utilizadas foram feições morfológicas do terreno extraídas dos modelos, segundo metodologia desenvolvida por Santos et al. (2016). Para a avaliação, aplicaram-se os métodos baseados em feições pontuais e lineares apresentados no Capítulo 2.

Após aplicar o método de avaliação da acurácia posicional 3D por meio de feições pontuais, obteve-se como resultado as discrepâncias 3D para a amostra de 40 pontos. Calculou-se também o RMS das discrepâncias, no qual se verificou as condições segundo o Decreto nº 89.817. Dessa forma, o produto avaliado foi classificado na Classe C para a escala 1:100.000. A Tabela 6 apresenta algumas estatísticas descritivas e classificação do produto avaliado. A Figura 40 mostra os valores de discrepâncias 3D (d_{3D}) comparados com o PEC3D (Figura 40 a) e os valores do RMS comparado EP3D (Figura 40 b). Vale lembrar que para cada amostra os valores de PEC3D e EP3D variam, pois estes dependem dos valores de discrepâncias 2D e Z de cada ponto.

Tabela 6 - Avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais. Estatísticas descritivas e classificação quanto aos valores de PEC3D e EP3D

Média	RMS	Mínimo	Máximo	Classe C - 1:100.000			
				PEC3D	EP3D	%($d_{3D} \leq \text{PEC3D}$)	%($\text{RMS} \leq \text{EP3D}$)
43,3	49,83	11,32	126,71	Variável	Variável	97,5	92,5

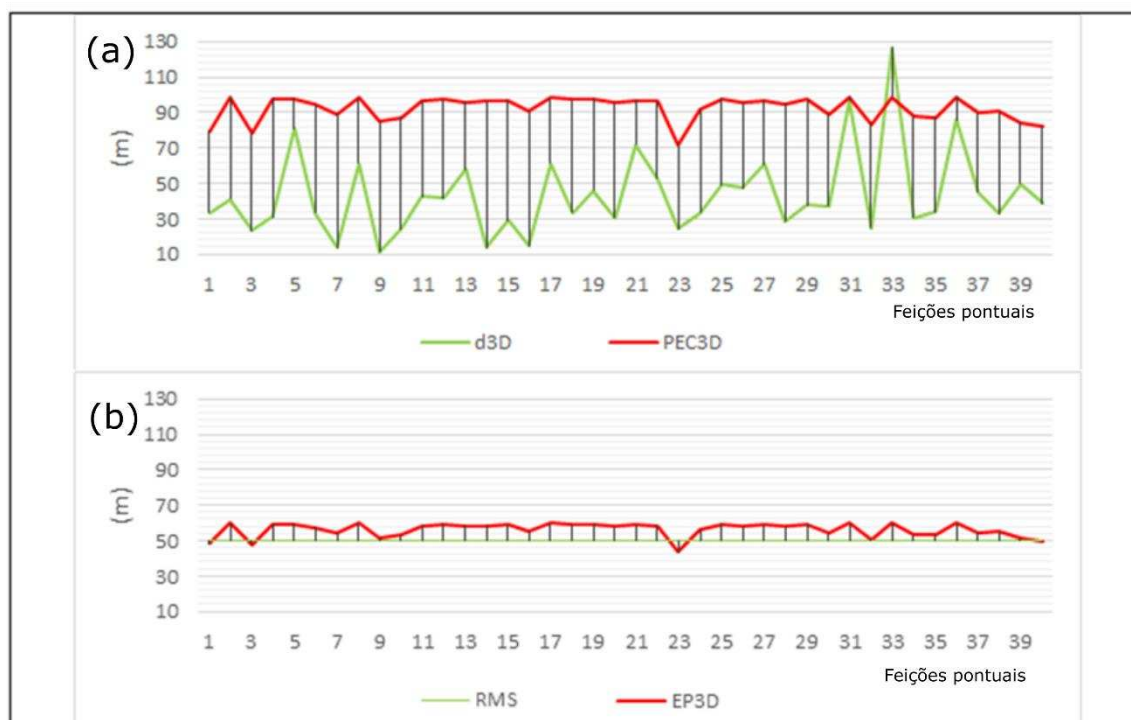


Figura 40 - Avaliação da acuracia posicional 3D por feições pontuais. (a) Gráfico das discrepâncias 3D e PEC 3D. (b) Gráfico dos valores de EP3D para amostra de pontos e RMS

A avaliação por feições pontuais resultou na classificação do MDS SRTM na Classe C para escala 1:100.000 segundo as tolerâncias definidas pela metodologia de Santos (2015) e pelo Decreto nº 89.817. Os valores de discrepâncias 3D foram de 43,3 metros em média, e RMS de 49,83 m. Verificou-se uma grande variação nos valores de discrepâncias 3D, obtendo mínima de 11,32 m e máxima de 126,71 m. Os resultados foram próximos aos resultados encontrados por Santos (2015), no qual, o autor utilizou um número superior de amostras. Verifica-se também, que os valores obtidos por esta metodologia são superiores aos valores de acurácia descritos pelas especificações técnicas do MDS SRTM.

A seguir são apresentados os resultados encontrados das metodologias de avaliação da acurácia 3D que utilizam feições lineares. Os métodos utilizados foram a distância de Hausdorff, influência do vértice, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo. Como resultados destas metodologias, obtiveram-se valores de discrepâncias 3D para o conjunto de linhas avaliadas. Vale ressaltar que apenas o método do *buffer* simples não resulta em valores de discrepância, no qual apenas analisaram-se os valores da porcentagem de inclusão da linha de teste no sólido de referência gerado. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7 e na Figura 41.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas dos métodos de avaliação da acurácia posicional 3D que utilizam feições lineares

	Distância de Hausdorff	Influência do vértice	Banda épsilon	Buffer duplo (largura do <i>buffer</i> 55 m)	Buffer simples
Média (m)	21,89	21,07	19,94	26,79	-
RMS (m)	22,82	22	20,74	28,1	-
Máximo (m)	39,11	36,15	33,45	43,74	-
Mínimo (m)	14,45	12,87	12,11	14,21	-
Classe A $d_{3D} \leq PEC_{3D}$	100%	100%	100%	100%	90%
Classe A $RMS \leq EP_{3D}$	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	-

Com relação às estatísticas descritivas apresentadas pela Tabela 7, os métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice e banda épsilon obtiveram resultados similares. Os menores valores das estatísticas descritivas foram encontrados no método da banda épsilon. Por outro lado, os maiores valores foram obtidos pelo *buffer* duplo.

Ainda sobre a Tabela 7, os resultados mostram que 90% das discrepâncias 3D encontradas nas metodologias por feições lineares apresentaram valores iguais ou menores que o PEC_{3D} , e o RMS das discrepâncias 3D foi menor que o EP_{3D} (com exceção ao *buffer* simples). Dessa forma, as metodologias utilizadas classificaram o produto testado na classe A, para a escala 1:100.000 segundo as tolerâncias propostas neste trabalho, com base no Decreto n° 89.817.

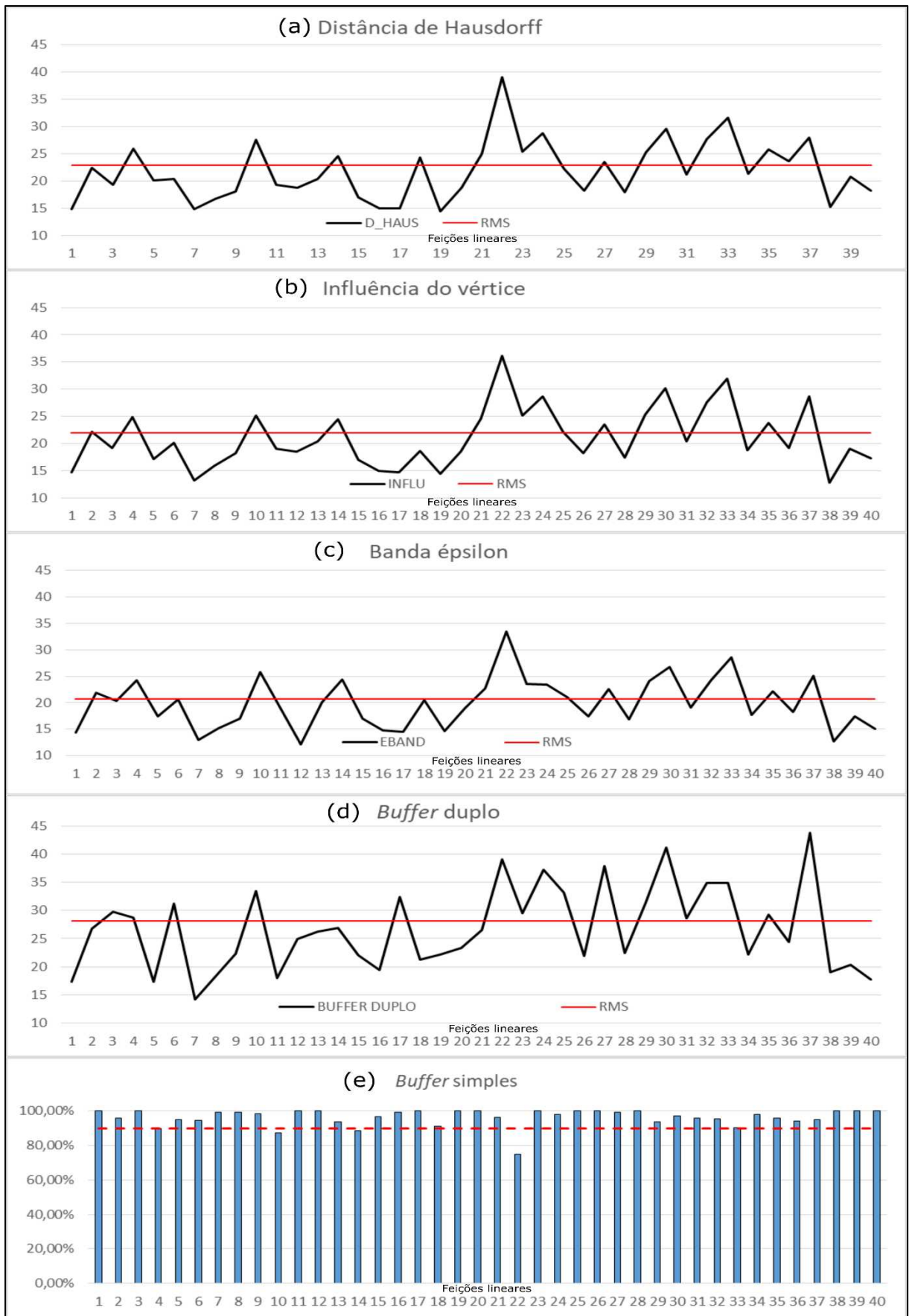


Figura 411 - Resultados dos métodos de avaliação da acurácia posicional 3D. Gráfico das discrepâncias e RMS do Método da distância de Hausdorff (a), influência do vértice (b), banda épsilon (c), Buffer duplo (d). Resultados do *buffer simples* (e)

Conforme os gráficos apresentados pela Figura 41, os três primeiros métodos (Figura 41 a, b e c) mostram comportamentos bastante similar, sendo possível notar que nestes casos o maior valor de discrepâncias foi obtido na linha 22. Quanto ao método do *buffer* duplo, os resultados em sua maioria, foram superiores as demais metodologias. Este resultado é consequência da largura do *buffer* utilizada, uma vez que a largura é proporcional ao valor de discrepância 3D de acordo com a Equação 21. Contudo, os resultados encontrados por estas metodologias são próximos aos valores de acurácia tridimensional descritos pelas especificações técnicas do MDS SRTM avaliado.

No método do *buffer* simples (Figura 41 e), a linha tracejada mostra a tolerância predefinida (90%). De acordo com os resultados deste método, apenas as linhas de número 4, 10, 14 e 22 resultaram em valores de porcentagem abaixo da tolerância. Portanto, ao analisar o percentual de inclusão das linhas de teste nos sólidos de referência, obteve-se um percentual de inclusão de 90%.

Em relação aos resultados encontrados nas metodologias que utilizam feições lineares e a avaliação por feições pontuais, verifica-se que ao utilizar uma amostra de pontos, obteve-se uma avaliação mais rigorosa, com valores de discrepâncias 3D superiores aos métodos que utilizam feições lineares. Tal divergência está relacionada ao fato de que a avaliação por pontos analisa as discrepâncias pontuais da amostragem utilizada, enquanto os métodos baseados em feições lineares representam discrepâncias 3D médias entre as feições analisadas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em suma, este estudo apresentou a aplicação dos métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice, banda épsilon, *buffer* simples e *buffer* duplo em dados tridimensionais. Diante dos resultados encontrados nos experimentos realizados, percebe-se o potencial e a viabilidade prática destas metodologias na avaliação da acurácia posicional 3D.

O experimento com dados simulados possibilitou atestar a eficiência das metodologias propostas neste trabalho. Nos métodos da distância de Hausdorff, influência do vértice ficou clara a sensibilidade destas técnicas quanto à quantidade de vértices presentes nas feições lineares avaliadas. Nos métodos que utilizam *buffer*, os resultados mostram que ao realizar iterações, variando-se a largura do *buffer*, é possível inferir no comportamento da linha de teste em relação à linha de referência e obter medidas como a largura ideal para se calcular discrepâncias 3D por meio do método do *buffer* duplo.

No experimento com dados reais avaliou-se a acurácia das componentes planimétrica e vertical simultaneamente do produto MDS SRTM, utilizando-se feições morfológicas do terreno. O MDS SRTM foi classificado na avaliação por feições lineares segundo as tolerâncias 3D propostas neste estudo, que foram baseadas no Decreto nº 89.817. Para as cinco metodologias que utilizam feições lineares, o produto foi classificado como classe A para a escala 1:100.000. O método de avaliação da acurácia posicional 3D por feições pontuais, proposto por Santos (2015), classificou o mesmo produto na classe C para a mesma escala.

Os valores de discrepâncias 3D encontrados pelos métodos que utilizam feições lineares foram correspondentes à acurácia descrita pelas especificações técnicas do SRTM, o que não acontece na avaliação por feições pontuais. A diferença nos resultados das discrepâncias encontradas por diferentes primitivas geométricas se deve ao fato de que feições pontuais retratam discrepâncias locais, enquanto que ao se utilizar feições lineares obtêm-se discrepâncias posicionais médias ao longo das feições avaliadas. Dessa forma, verifica-se que a avaliação por feições lineares deve ser aplicada conjuntamente a avaliação por feições pontuais.

Quanto à classificação, o método proposto por Santos (2015), mostrou resultados mais restritivos e consistentes. Devido à ausência de normas que dizem respeito à

avaliação por feições lineares, este trabalho baseou-se no Decreto n° 89.817, porém as tolerâncias e condições definidas neste decreto não foram desenvolvidas para essa primitiva geométrica. Recomendam-se mais estudos a respeito de normas e padrões voltados à acurácia posicional 3D especificamente para métodos que utilizam feições lineares. Recomenda-se também, estudos para desenvolver técnicas que possibilitem analisar a distribuição espacial e tamanho amostral de feições lineares na avaliação da acurácia posicional 3D.

Além destes experimentos, neste estudo, desenvolveu-se uma equação para obter discrepâncias 3D por meio do método do *buffer* duplo, que em ambos os experimentos mostrou-se mais aplicável quando comparado às demais metodologias utilizadas, sendo uma alternativa à equação proposta por La Vega et al. (2016). Apesar dos resultados promissores, esta equação foi desenvolvida por meio de testes empíricos, recomendando-se maiores estudos. Além disso, recomenda-se a aplicação destas metodologias em diferentes dados espaciais e regiões de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, I. (1994). “**Base de Données Vectorielles et Erreur Cartographique. Problèmes Posés ParLe Controle Ponctuel.** Une Méthode Alternative Fondée Sur La Distance de Hausdorff: Le Controle Linéaire.” Paris, France: Université Denis-Diderot.

ABBAS, I., Grussenmeyer, P., and Hottier, P. (1995). Contrôle de la planimétrie d’une base de données vectorielles: une nouvelle méthode basée sur la distance de Hausdorff: la méthode du contrôle linéaire. *Bul. S.F.P.T.*, (137), pp. 6–11.

ARAÚJO, V. O. H. de. **Usabilidade de geoportais: o caso do visualizador da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Defesa) - Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, 2016.

ARIZA-LÓPEZ, F. J. (2002). “**Calidad en la producción cartográfica**”. Madrid: Rama.

ARIZA-LÓPEZ, F. J.; ATKINSON, A; RODRIGUEZ, J. (2008). Acceptance curves for the positional control of geographic databases. *Journal of Surveying Engineering*, v. 134, n. 1, p. 26-32.

ARIZA-LÓPEZ, F. J.; ATKINSON, A. (2008). Analysis of Some Positional Accuracy Assessment Methodologies. *Journal of surveying Engineering*, 134, pp. 45–54.

ARIZA-LÓPEZ, F. J. et al (2011). **Influence of sample size on line-based positional assessment methods for road data.** *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 66, n. 5, p. 708-719.

ATKINSON-GORDO, A. D.; ARIZA-LOPEZ, F. J (2002). **Nuevo enfoque para el análisis de la calidad posicional en cartografía mediante estudios basados en la geometría lineal.** In: *Proceedings XIV International Congress of Engineering Graphics*, Santander, Spain. 2002. p. 1-10.

BARBOSA, G. H. S. P. C. **Estrutura do Habitat e Diversidade de Macroinvertebrados Bentônicos em Corpos D’ Água da bacia do ribeirão dos Macacos, MG.** Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. 2011.

BRASIL. 1984. DECRETO N° 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984. **Normas Técnicas Da Cartografia Nacional.** Brasil. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm.

BLAKEMORE, M. (1984). “Generalization and Error in Spatial Databases.” **Cartographica** 21: 131–39.

CAPSTICK, D.; HEATHCOTE, G.; HORGAN, J.; AND SARGENT, I. (2007). “Moving Towards 3D: from a National Mapping Agency Perspective”. **The Cartographic Journal**, 44 (3).

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. CÂMARA, G. et. al., **Análise espacial de dados geográficos**, v. 2, 2004.

HARDING, J. (2006) In: DEVILLERS, RODOLPHE; JEANSOULIN, ROBERT. **Fundamentals of spatial data quality**. London, ISTE. ISBN, v. 1905209568.

HANGOÛËT, J. F. (2006) In: DEVILLERS, RODOLPHE; JEANSOULIN, ROBERT. **Fundamentals of spatial data quality**. London, ISTE. ISBN, v. 1905209568.

DSG. 2011. **ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS GEOESPACIAIS VETORIAIS (ETADGV)**. Brasil. http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf>. Acesso em: 20 abril 2017.

DSG. **ET-CQDG: ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS**. 1 ed. Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.

FERNÁNDEZ, D. C. J., VALERIANO, M. M., ZANI, H., AND ANDRADES FILHO, C. O. 2012. “**Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação.**” Revista Brasileira de Cartografia.

GALO, M.; CAMARGO, P. de O. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas**. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, p.41-48, Florianópolis – Brasil. 1994.

GALO, M.; ALUIR P. D. P.; FRANCE M. F. 2001. **O Uso De Feições No Controle De Qualidade Em Cartografia**.XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Porto Alegre, Brazil.

GIORDANO, A.; VEREGIN, H. (1994). “**Il controllo di qualità nei sistemi informativi territoriali: come valutare e mantenere l'accuratezza del database**”. il Cardo.

GOODCHILD, M. F.; GOPAL, S. (Ed.). **The accuracy of spatial databases**. CRC Press, 1989.

GOODCHILD, M. F.; HUNTER, G. J. (1997). "A Simple Positional Accuracy Measure for Linear Features." **International Journal of Geographical Information Science** 11 (3). Taylor & Francis: 299–306.

HAKALY, M. (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 37, pp. 682–703.

HANGOUËT, J.F., (1995). Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines. **Proceedings AutoCarto** 12, 1–10.

IBGE. Avaliação da qualidade de dados geoespaciais. **Manuais técnicos em geociências**, ISSN 0103-9598; n. 13, Coordenação de Cartografia. Rio de Janeiro, 96p. 2017

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19157: Geographic information — Data quality**. 2.1c2 ed., 2013. 170 p.

LA VEGA, P. G. de; ARIZA-LÓPEZ, F. J.; MOZAS-CALVACHE, A. T. (2016). **Models for positional accuracy assessment of linear features: 2D and 3D cases**. Taylor & Francis: Survey Review. University Of Jaen, p. 1-14. 03 maio 2016.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. (2005). "**Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**". Taylor & Francis.

LUGNANI, J. B. 1986. Estimativa de Qualidade de Feições Digitalizadas - Um Novo Método. **Revista Brasileira de Cartografia** 39.

JOHNSTON, D.; TIMLIN, D.; SZAFONI, D.; CASANOVA, J.; DILKS, K. (2000). **Quality Assurance/Quality Control Procedures for ITAM GIS Databases**. US Army Corps of Engineer Research and Development Center.

KAGAWA, Y.; SEKIMOTO, Y.; SHIBASKI, R. (1999). **Comparative study of positional accuracy evaluation of line data**. Proceedings of the ACRS.

MASRY, S. E.; GAUTHIER J. R. R.; and Y. C. LEE. (1980). "**Accuracy and Time Comparisons of Digital Maps**." In International Society of Photogrammetry. Hamburg.

MONICO, J. F. G.; DAL POZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. (2009). Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, 23 set. 2009.

MORRISON, J. L. (1995). Spatial data quality. **Elements of spatial data quality**, v. 202, p. 1-12.

MOZAS – CALVACHE, A.T. 2007. “**Control de La Calidad Posicional Em Cartografia Por Elementos Lineales.**” Jaén: Universidad de Jaén, Spain.

MOZAS-CALVACHE, A.; and ARIZA-LÓPEZ, F. J (2008). Principales métodos de control posicional por elementos lineales. Comparación mediante su aplicación a líneas sintéticas. *GeoFocus*. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n. 8, p. 187-204.

MOZAS-CALVACHE, A. T.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. (2010). Methodology for positional quality control in cartography using linear features. **The Cartographic Journal**, 47(4), 371–378.

MOZAS-CALVACHE, A. T.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. (2011). New method for positional quality control in cartography based on lines. A comparative study of methodologies. **International Journal of Geographical Information Science**, 1–15.

MOZAS-CALVACHE, A.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. (2014). **Adapting 2D positional control methodologies based on linear elements to 3D**. *Survey Review*, 47(342), pp. 195–201.

MOZAS-CALVACHE, A.; UREÑA-CÁMARA, M.; PÉREZ-GARCÍA, J. L. (2013). **Accuracy of contour lines using 3D bands**. *International Journal of Geographical Information Science*.

NERO, M.; A. (2005). “**Propostas Para O Controle de Qualidade de Bases Cartográficas Com Ênfase Na Componente Posicional**”. São Paulo, Brazil: Escola Politécnica da USP, Brazil.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. (2003). “**Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos: uma Proposta Metodológica**”. Presidente Prudente, Brazil: Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, Brasil.

ÖSTMAN, A. (1997). **The Specification and Evaluation of Spatial Data Quality**. In: *Proceedings of 18th International Cartographic Conference*. Stokolm, Sweden, p. 836-847.

PERKAL, J. (1956). **On epsilon length**. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, (4), pp. 399–406.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.; CHAPIN, E.; MARTIN, J.; DAFFER, W.; HENSLEY, S. **An Assessment of the SRTM Topographic Products**. Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, United States of America. 2005.

SANTOS, A. P. (2010). **Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o uso de Estatística Espacial**. 2010. 110 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

SANTOS, A. P. (2015). **“Controle de qualidade cartográfica: metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais”**. 2015. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SANTOS, A. P. et al (2015). Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 2, p.233-250, abr-jun, 2015. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/41939/25560>>. Acesso em: 24 maio 2017.

SANTOS, A. P. et al (2016). **Avaliação da acurácia posicional planimétrica em modelos digitais de superfície com o uso de feições lineares**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 22, n. 1, p.157-174, jan-mar, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/49633/29683>>. Acesso em: 24 maio 2017.

SHI, W. (2010). **Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses**. CRC Press.

TVEITE, H.; LANGAAS, S. (1999). “An accuracy assessment method for geographical line data sets based on buffering”. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 13, n. 1, p. 27-47.

VAN NIEL, T. G., AND MCVICAR, T. R. (2002). Experimental evaluation of positional accuracy estimates from a linear network using point and line-based testing methods. **International Journal of Geographical Information Science**, 5(16), pp. 455–473.

VIEIRA C. A. O.; MATHER P. M.; BORGES P. A. F. 2002. Assessing the Positional Accuracy of Remotely Sensed Products. 5th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Melbourne, Australia.

APÊNDICE 1

A.1 Implementação do método da distância de Hausdorff 3D no ArcGIS 10.5.

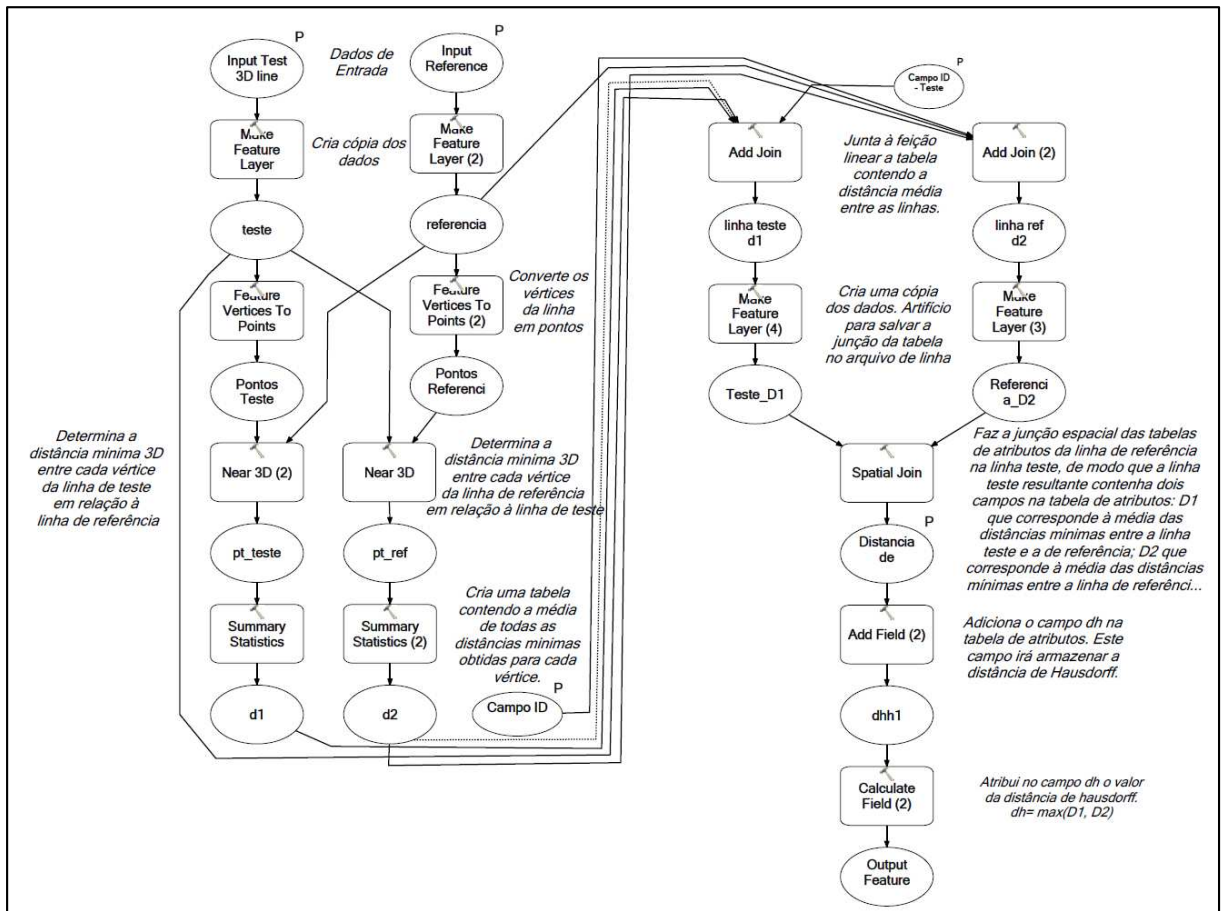


Figura 42 – Método da distância de Hausdorff 3D

A.2 Implementação do método da influência do vértice 3D no ArcGIS 10.5.

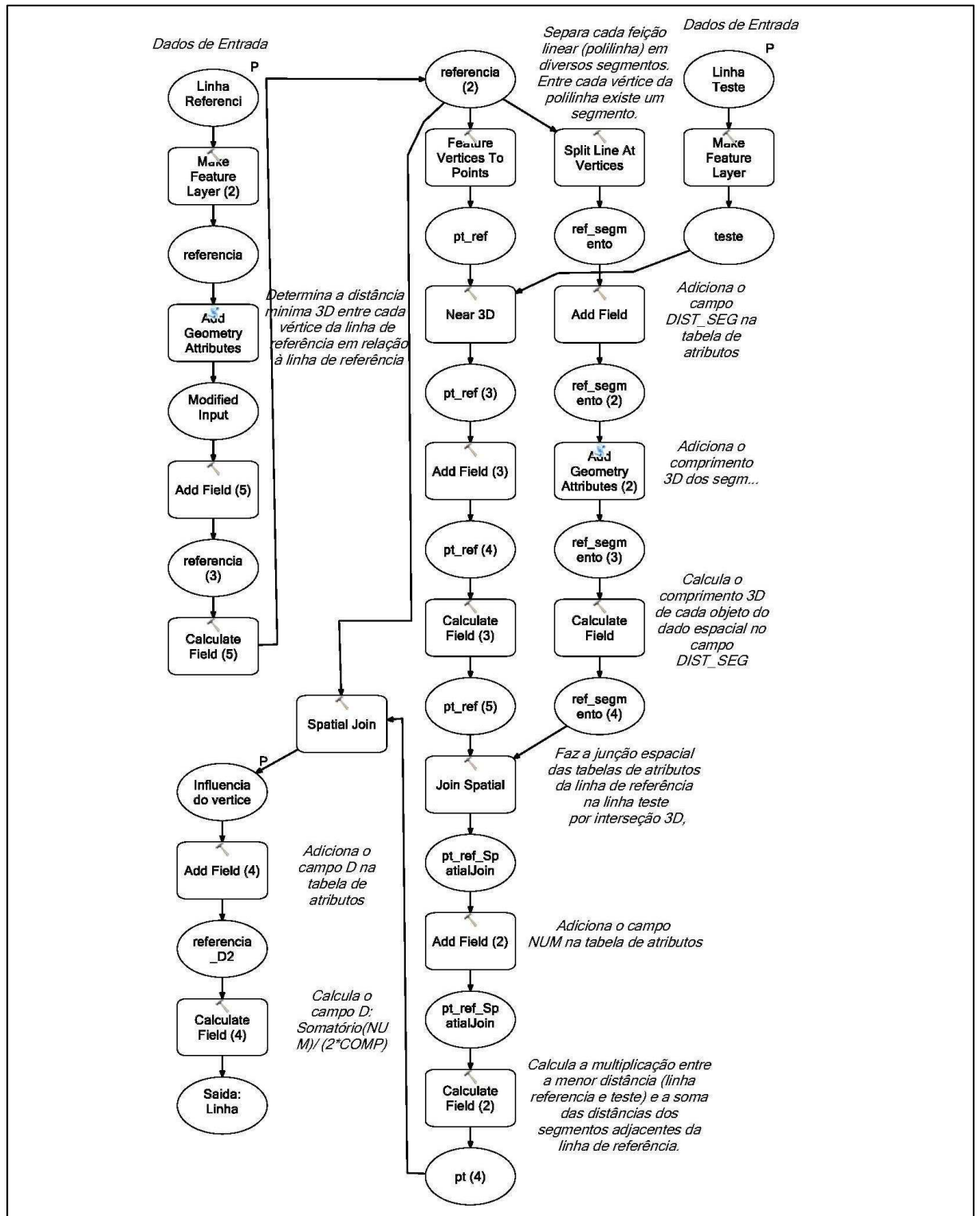


Figura 43 – Método da influência do vértice

A.3 Implementação do método da banda épsilon 3D no ArcGIS 10.5.

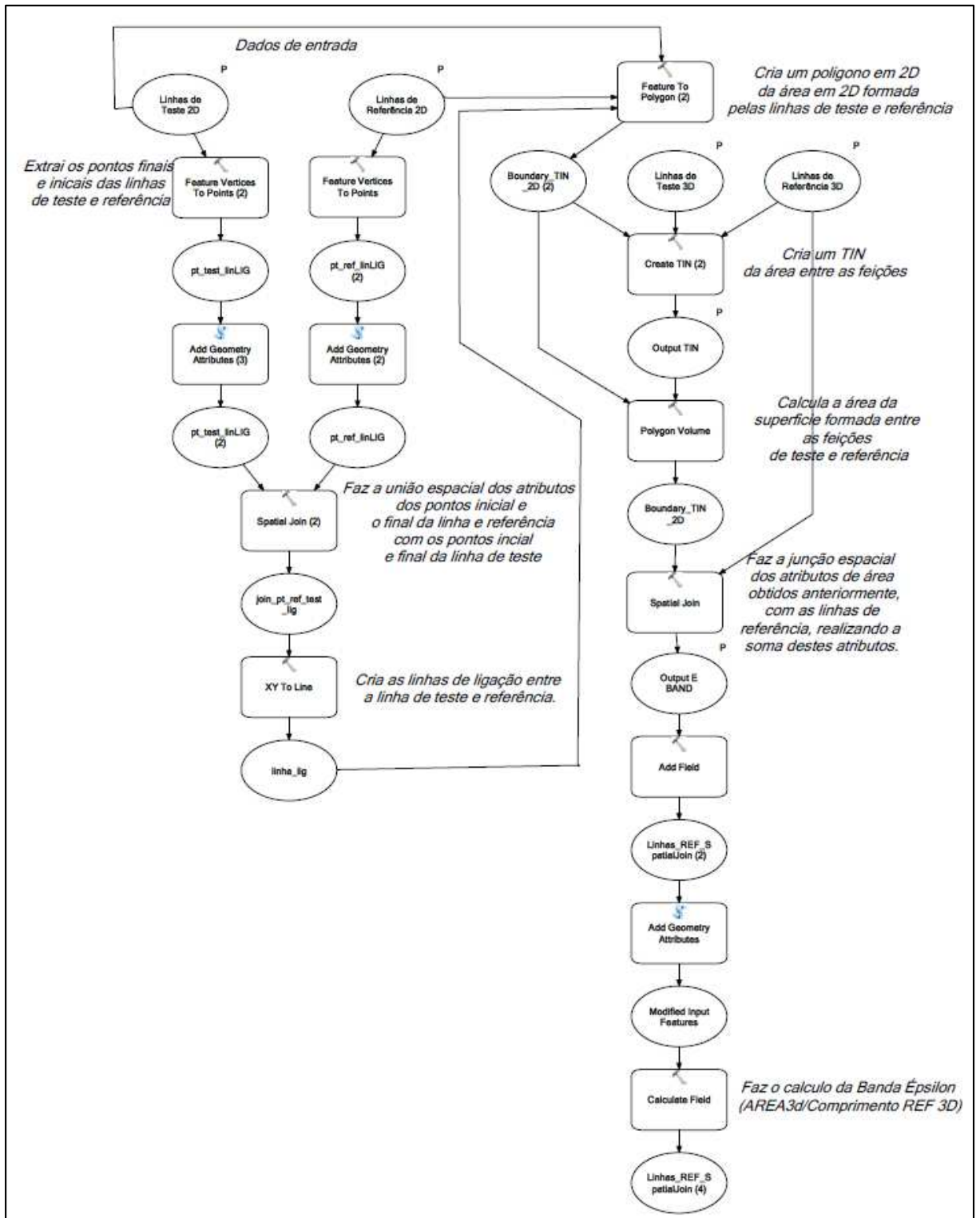


Figura 44 – Método da banda épsilon

A.4 Implementação do método da *buffer* simples 3D no ArcGIS 10.5.

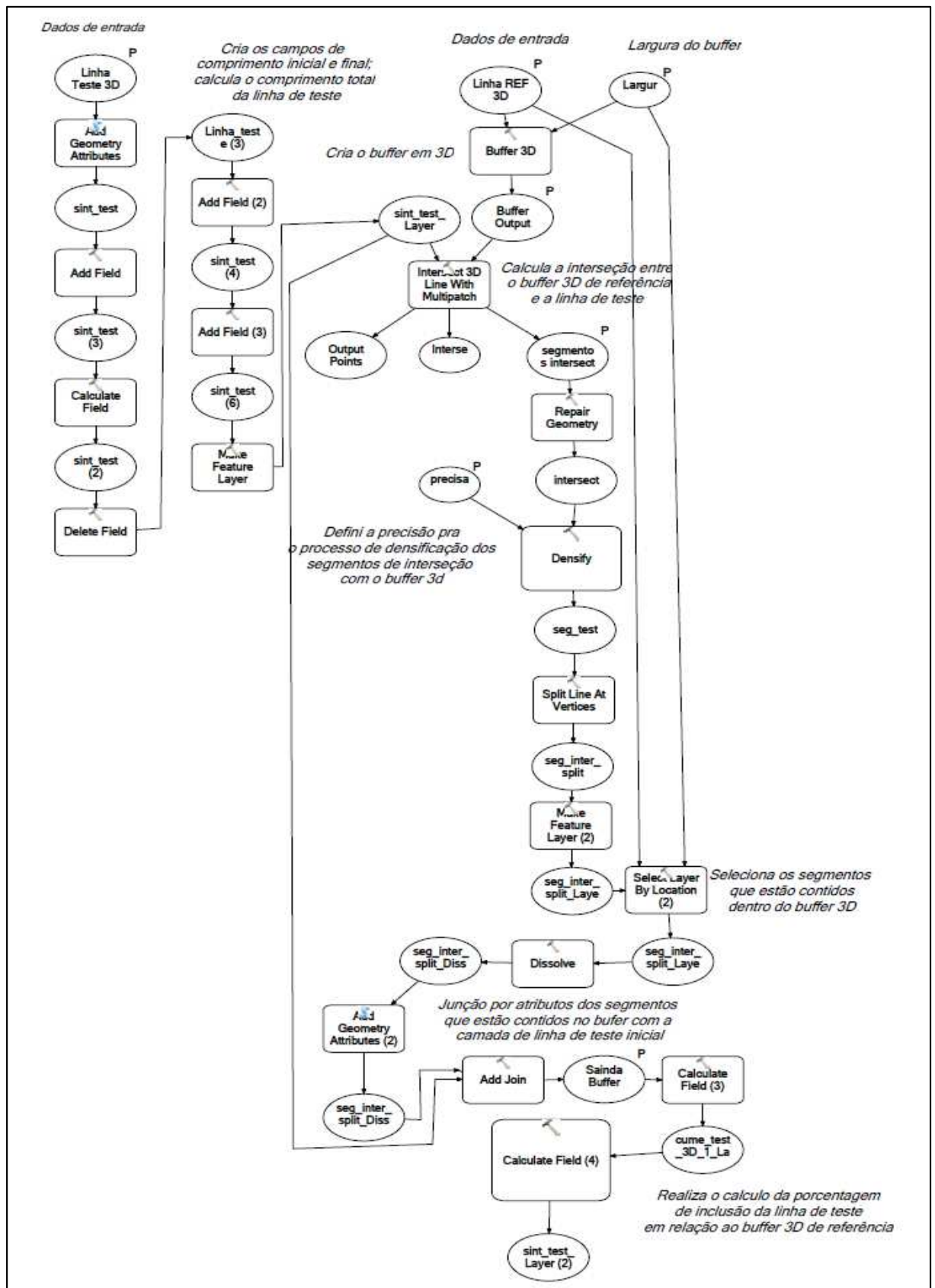


Figura 45 – Método do *buffer* simples

A.5 Implementação do método da *buffer* duplo 3D no AutoCAD.

1° Passo: criar uma esfera (*sphere*) de raio igual à largura do *buffer* nos vértices final e inicial das linhas de teste e referência (Figura 46 a);

2° Passo: criar uma circunferência com o raio igual à largura do *buffer* e utilizar o comando *sweep*, para aplicar a circunferência ao longo da linha de referência e de teste (Figura 46 b);

3° Passo: Realizar a subtração (*subtract*) das dos volumes de teste em relação ao de referência (Figura 46 c) e vice-versa (Figura 46 d);

4° Passo: Calcular a interseção (*intersect*) entre os *buffers* de referência e teste (Figura 46e);

5° Passo: Calcular os volumes dos sólidos gerados, e obter o valor de discrepância 3D segundo as equações 19 e ou 21.

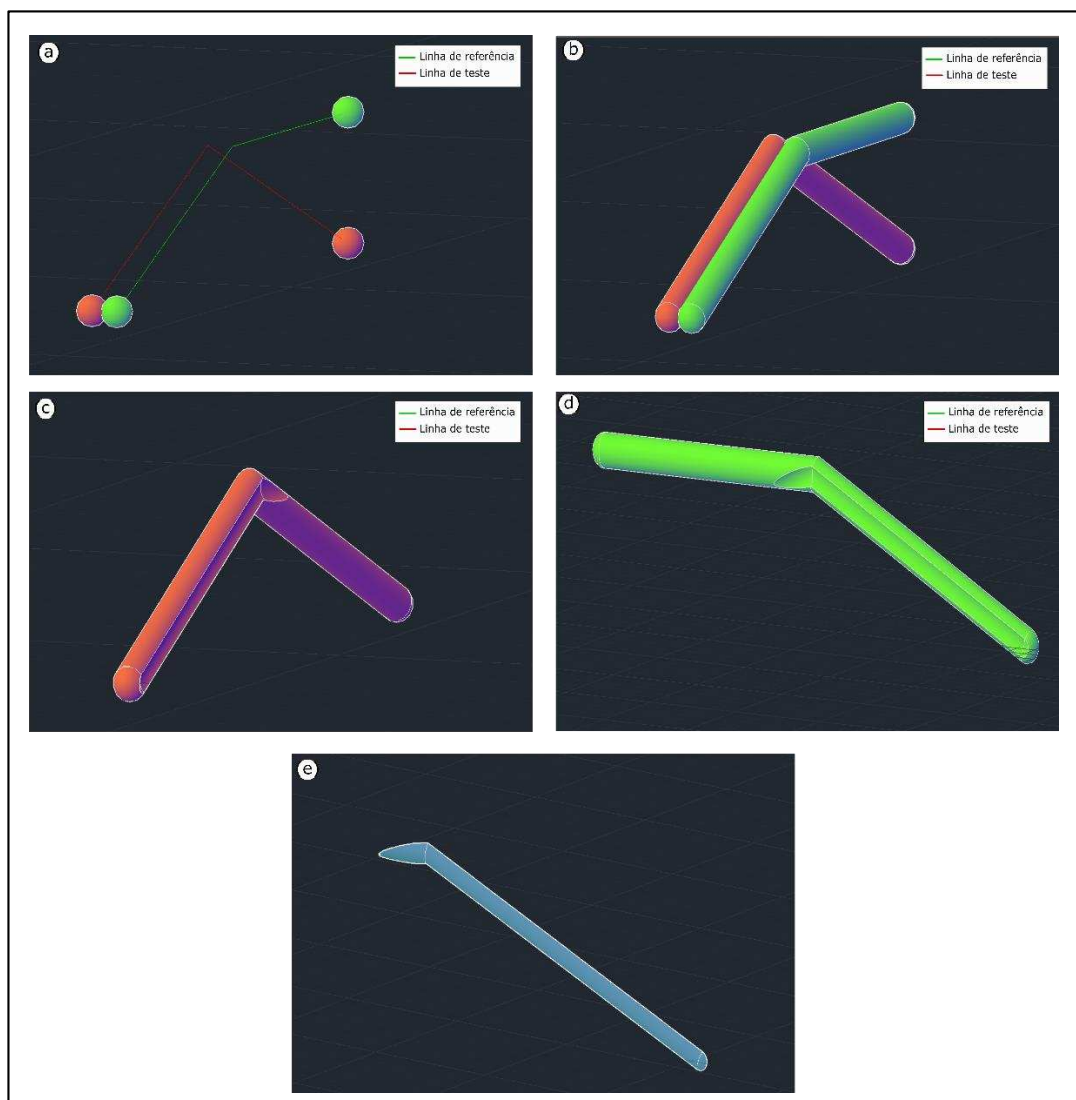


Figura 46 – Método do *buffer* duplo