



Avaliação da Acurácia Posicional Tridimensional de Produtos Cartográficos Utilizando um Elipsoide de Incertezas

Evaluation of Three-Dimensional Positional Accuracy of Cartographic Products Using an Elipsoide of Uncertainties

*Matheus Henrique Maia Lisboa*¹
*Afonso de Paula dos Santos*²
*Nilcilene das Grças Medeiros*³
*Marcos Vinicius Sanches Abreu*⁴

Recebido em julho de 2019.
Aprovado em setembro de 2019.

RESUMO

No Brasil, a avaliação da acurácia posicional de produtos cartográficos segue as diretrizes do Decreto nº. 89.817/1984. Esse decreto divide a acurácia posicional em duas componentes: planimétrica e altimétrica. Produtos tridimensionais, como Modelos Digitais de Superfície/Elevação (MDS/MDE), acabam sendo avaliados em componentes separadamente, mas alguns autores, tais como Santos (2015) e Li et al. (2005) demonstraram que a forma mais eficiente de se avaliar esse tipo de produto é por meio da resultante entre as componentes planimétricas e altimétricas. Sendo assim, este trabalho propõe um método para a avaliação da acurácia tridimensional de produtos cartográficos, por meio das componentes tridimensionais de uma superfície geométrica, no caso em estudo, um elipsoide, cujas dimensões são dadas pelas tolerâncias descritas no Decreto nº. 89.817/1984. Posteriormente, o método proposto (chamado de EPSI) foi confrontado com a metodologia do Decreto nº. 89.817/1984, em conjunto com a ET-CQDG (DSG, 2016). Para verificar a eficiência do método, foram simuladas 15.000 discrepâncias e, em aproximadamente 83% dos casos, o método proposto foi mais restritivo se comparado à avaliação da planimetria, e, em 58% dos casos, quando comparado à análise da altimetria. No restante dos casos, o método se apresentou equivalente à análise separada da planimetria e altimetria, descrita pela ET-CQDG (DSG, 2016). Utilizando exemplos

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Brasil. E-mail: mhmlisboa@hotmail.com

²Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Brasil. E-mail: afonso.santos@ufv.br

³Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Brasil. E-mail: nilcilene.medeiros@ufv.br

⁴Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Brasil. E-mail: marcos.abreu@ufv.br

práticos, percebe-se que a metodologia tridimensional é mais restritiva que a usualmente aplicada.

PALAVRAS-CHAVE: Acurácia posicional tridimensional. Elipsoide dos Erros. Modelo Digital de Superfície. Controle de qualidade cartográfica.

ABSTRACT

In Brazil, the positional accuracy evaluation of cartographic products follows the guidelines of Decree n. 89,817 / 1984. The decree divides positional accuracy into two components: planimetric and altimetric. Three-dimensional products, such as Digital Surface or Elevation Models (MDS / MDE), are often evaluated separately, but some authors, such as Santos (2015) and Li et al. (2005) mention that the most efficient way to evaluate this type of product is through the resultant between planimetric and altimetric components. This work proposes a method for the three-dimensional accuracy evaluation of cartographic products by three-dimensional components of a geometric surface, in this study an ellipsoid, whose dimensions are given by the tolerances described in Decree n. 89,817 / 1984. Subsequently, the proposed method (called EPSI) was confronted with both Decree 89,817 / 1984 methodology and ET-CQDG (DSG, 2016), a Brazilian technical specification. In order to verify the method efficiency, 15,000 discrepancies were simulated and in approximately 83% of cases the proposed method was more restrictive when compared to planimetry analysis, and in 58% of cases when compared to altimetry evaluation. In the remaining cases, the method was equivalent to the separate planimetry and altimetry analysis, described by ET-CQDG (DSG, 2016). Using practical examples, it can be seen that the three-dimensional methodology is more restrictive than the one usually applied.

KEYWORDS: Three-dimensional Positional Accuracy. Errors Ellipsoid. Digital Surface Model. Cartographic quality control.

* * *

1 Introdução

O controle de qualidade cartográfica é o elemento fundamental para validação do produto cartográfico, pois o legitima e identifica seus erros e inconsistências. A ISO 19157 aborda especificamente os elementos da qualidade dos dados geoespaciais, sendo eles: completude, consistência lógica, acurácia temática, acurácia posicional, acurácia temporal e usabilidade (ISO, 2011).

Segundo Mozas e Ariza (2014), um dos principais elementos da qualidade cartográfica é a acurácia posicional, já que verifica o quão próximo de uma referência, posicionalmente, um produto está.

No Brasil, a avaliação da acurácia posicional de produtos cartográficos segue as diretrizes do Decreto nº. 89.817 (BRASIL, 1984), que classifica o produto quanto à sua fidelidade posicional, por meio da discrepância entre pontos homólogos no produto teste e sua referência. Este padrão classifica o produto conforme sua qualidade posicional planimétrica e altimétrica, avaliadas separadamente. Em 2016, foi publicada a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (DSG, 2016), que apresenta uma metodologia clara para o controle de qualidade posicional, baseada nos preceitos do Decreto nº. 89.817/1984.

Santos et al. (2016) afirmam que usualmente, no controle de qualidade posicional de produtos cartográficos tridimensionais, como Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Superfície (MDS), a avaliação da acurácia posicional planimétrica é negligenciada, sendo realizada apenas a avaliação altimétrica. Para esses autores, essa forma de avaliação é equivocada, visto que, para uma avaliação mais acertada, devem ser utilizados pontos homólogos tanto na planimetria quanto na altimetria, ou seja, deve-se realizar uma avaliação tridimensional.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo de metodologia para a avaliação da acurácia posicional tridimensional, no controle de qualidade de produtos cartográficos. O estudo se baseia na forma matemática de um elipsoide, cujas tolerâncias seguem aquelas definidas no Decreto nº. 89.817/1984 e na ET-CQDG (DSG, 2016).

2 Método de avaliação da acurácia posicional tridimensional com o Elipsoide de Incertezas (EPSI)

O Decreto nº. 89.817/1984 estabelece as normas da cartografia nacional. Dentre elas, tem-se o Padrão de Exatidão Cartográfica, que classifica uma carta quanto a sua acurácia posicional planimétrica e altimétrica. Essa acurácia posicional leva em consideração a discrepância entre pontos no produto de teste e seus homólogos em uma referência mais

acurada. As cartas são classificadas em A, B e C, e cada uma possui duas tolerâncias, chamadas de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Erro Padrão (EP). Após alguns anos, com o avanço da informática e dos produtos cartográficos digitais, foi publicada pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército (DSG) a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), no âmbito da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) (DSG, 2015), que apresenta uma nova classe mais restritiva. Dessa forma, os produtos podem ser enquadrados segundo quatro classes de acurácia posicional: A, B, C e D. Na Tabela 1, são apresentadas as tolerâncias das classes descritas nas normas Decreto n°. 89.817/1984 e ET-ADGV (DSG, 2015).

Tabela 1– Valores do PEC e do EP segundo Decreto n°. 89.817/1984 e ET-ADGV (2015)

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC (mm)	EP (mm)	PEC (m)	EP (m)
A	0,28	0,27	0,27	1/6
B	0,50	0,30	1/2	1/3
C	0,80	0,50	3/5	2/5
D	1,00	0,60	3/4	½

Fonte: Elaborada pelos autores.

Já em 2016, foi lançada, também pela DSG, a ET-CQDG (DSG, 2016), que apresenta uma metodologia clara para a avaliação da acurácia posicional. Com base na norma, um produto com acurácia posicional deve atender a duas condições simultâneas, sendo elas: i) 90% das discrepâncias entre os pontos de checagem no produto e seu homólogos na referência devem ser inferiores ao valor do PEC, na classe e na escala de teste, e ii) o valor da raiz média quadrática (RMS) das discrepâncias deve ser inferior ao valor de EP, na classe e na escala testada.

Tanto o Decreto n°. 89.817/1984 quanto as especificações técnicas da INDE não apresentam uma avaliação tridimensional da acurácia, contemplando somente a acurácia planimétrica e altimétrica examinadas separadamente. Nesse contexto, o método apresentado neste estudo propõe a

integração desses conceitos, por meio de um elipsoide cujos semieixos são dados pelas tolerâncias definidas no referido Decreto.

O elipsoide, definido pela Equação 1, apresenta em seu numerador as localizações espaciais $(X - X_0, Y - Y_0, Z - Z_0)$ das coordenadas, e os denominadores $(a, b$ e $c)$ representam os semieixos da figura geométrica.

$$\frac{(X - X_0)^2}{a^2} + \frac{(Y - Y_0)^2}{b^2} + \frac{(Z - Z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

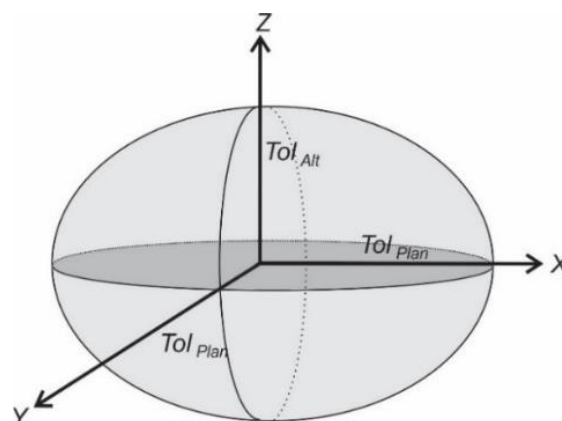
Como a norma brasileira define a tolerância para a resultante planimétrica, necessita-se juntar os termos planimétricos $(X$ e $Y)$ em uma componente, tendo, assim, um elipsoide biaxial, como apresentado na Equação 2.

$$\frac{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}{a^2} + \frac{(Z - Z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (2)$$

Esse método propõe que o elipsoide represente as tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984, de forma que os valores dos semieixos $(a$ e $c)$ devem ser substituídos por elas: Tolerância planimétrica – TOL_{Plan} – e Tolerância altimétrica – TOL_{Alt} . Como o interesse são os pontos que estão no interior desse elipsoide, substitui-se a equação do elipsoide biaxial por uma inequação, conforme Equação 3, ilustrada pela Figura 1.

$$\frac{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}{Tol_{plan}^2} + \frac{(Z - Z_0)^2}{Tol_{alt}^2} \leq 1 \quad (3)$$

Figura 1 - Elipsoide cujos parâmetros são dados pelas tolerâncias do Decreto nº.89.817/1984



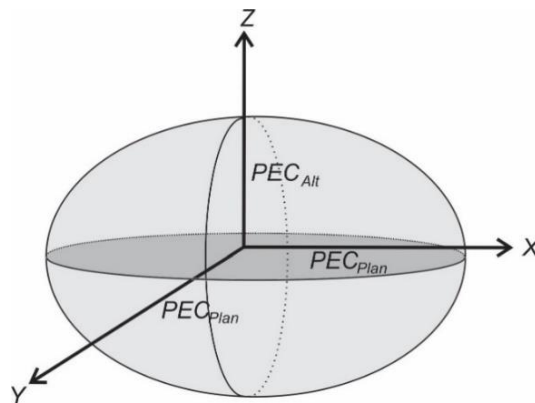
Fonte: Elaborada pelos autores.

Este elipsoide descrito na Figura 1 e na Equação 3, denominado Elipsoide de Incertezas (EPSI), deve ser centralizado no ponto de referência (X_0 , Y_0 e Z_0) e, análogo à metodologia proposta pela ET-CQDG (DSG, 2016), o método do EPSI deve satisfazer a duas condições, simultaneamente, para a classificação do produto cartográfico, quais sejam:

- a) As discrepâncias de 90% dos pontos testados devem atender à condição da Equação 4. Nesse caso, as coordenadas do produto de teste (X , Y e Z) devem ser substituídas na Equação 3, bem como as tolerâncias do PEC da escala referente e da classe de teste são substituídas no denominador (semieixos). Assim se analisa se a discrepância entre as coordenadas é satisfeita em, no mínimo, 90% dos casos. Na Figura 2, tem-se a representação geométrica dessa situação, em que a região contida no elipsoide da figura corresponde à região de aceitação da Equação 4

$$\frac{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}{PEC_{plan}^2} + \frac{(Z - Z_0)^2}{PEC_{alt}^2} \leq 1 \quad (4)$$

Figura 2 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo PEC do Decreto n°. 89.817/1984



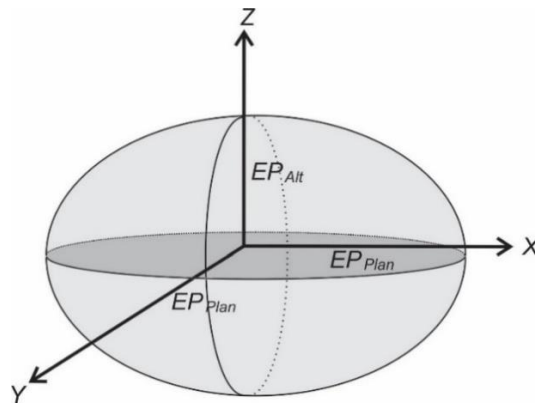
Fonte: Elaborada pelos autores.

- b) O RMS da amostra das discrepâncias, em cada componente (RMS_X , RMS_Y e RMS_Z), deve substituir o numerador da Equação 3, bem como as tolerâncias do EP na escala referente e na classe de teste

substituem as variáveis no denominador (semieixos). Assim se deve analisar se a Equação 5 é satisfeita.

$$\frac{RMS_X^2 + RMS_Y^2}{EP_{plan}^2} + \frac{RMS_Z^2}{EP_{alt}^2} \leq 1 \quad (5)$$

Figura 3 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo EP do Decreto nº. 89.817/1984

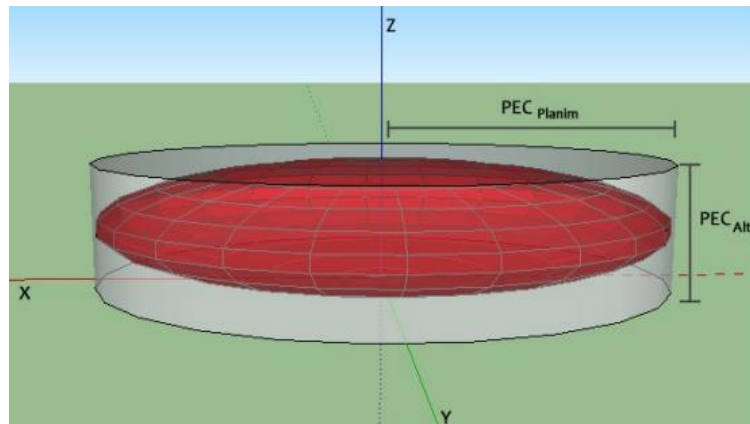


Fonte: Elaborada pelos autores.

Ilustrativamente, o modelo proposto analisa as componentes planimétricas e altimétricas em conjunto, utilizando o elipsoide como figura geométrica das tolerâncias. Já o modelo tradicional, que analisa as componentes planimétricas e altimétricas separadamente, utiliza um cilindro como figura geométrica para representar suas tolerâncias.

A Figura 4 ilustra uma comparação entre as figuras geométricas que representam as tolerâncias; a análise conjunta é representada geometricamente por um elipsoide, já a análise individual das tolerâncias é representada pelo cilindro, em que a tolerância planimétrica é representada pela base (círculo) e a tolerância altimétrica, pela altura.

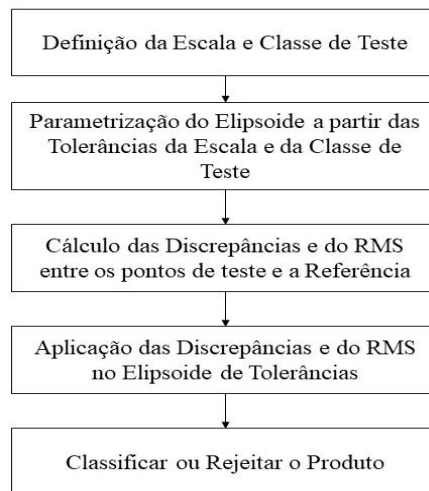
Figura 4 - Representação da tolerância tridimensional preconizada pelo Decreto n° 89.817/1984



Fonte: Elaborada pelos autores.

As etapas para a classificação da acurácia posicional tridimensional com o EPSI são apresentadas no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das etapas para a classificação com o elipsoide de tolerâncias



Fonte: Elaborada pelos autores.

Primeiramente, definem-se a escala e a classe de teste para, assim, se definirem as tolerâncias (PEC e EP) (i). Definidas as tolerâncias, passa-se para o dimensionamento dos semieixos do elipsoide, a partir delas (ii). Definidos os semieixos, realiza-se o cálculo das discrepâncias e do RMS entre os pontos de teste e seus homólogos na referência (iii). Aplicam-se as

discrepâncias na equação 4, analisando sua condição, e aplica-se o RMS na equação 5, analisando sua condição (iv). Por fim, ocorre a classificação ou rejeição do produto para a referida escala (v).

3 Experimento

A fim de avaliar a eficiência, bem como comparar os resultados do método proposto com os da metodologia da ET-CQDG (DSG, 2016), utilizaram-se dados simulados e um estudo de caso.

3.1. Análise da eficiência do Elipsoide de Incertezas (EPSI) utilizando dados simulados

Vários autores, como Shi e Liu (2000), Mozas e Ariza (2011), Tong et al. (2013) e Ferreira (2014), utilizam simulação para determinar como se comportam as incertezas em um ambiente controlado.

Neste trabalho, foi utilizado o software R, para simular um conjunto de discrepâncias planimétricas (E, N) e altimétricas (Z). As simulações foram feitas com a função *rnorm*, que simula uma distribuição normal, com média, variância e número de indivíduos variáveis (R, 2017).

Neste caso, as médias foram iguais a zero (o que significa que o conjunto de discrepâncias não apresenta efeitos sistemáticos), o número de indivíduos, igual a 30, e a variância alternou entre mínimo de 0,01 e máximo de 50,0.

Para classificar as discrepâncias simuladas, implementou-se, no ambiente MATLAB (2002), um programa que aplica uma estatística prévia nas discrepâncias, a fim de identificar *outliers* e tendências, e as classifica conforme a metodologia do EPSI concomitantemente à metodologia da ET-CQDG (DSG, 2016), para avaliar as diferenças entre as classificações.

Para a detecção de *outliers*, utilizou-se o teste do 3σ . De acordo com Nero (2005) e Santos et al. (2016) um ponto de checagem é considerado um *outlier* se o valor absoluto de sua discrepância posicional for superior ao triplo

da tolerância EP do Decreto nº 89.817/1984, para a classe e a escala testada. Já na análise de tendência, aplicou-se o teste *t* de *Student*, a um nível de confiança de 90%.

Foram simulados 500 conjuntos de dados, sendo que cada conjunto possuía 30 discrepâncias, o que totalizou 15.000 discrepâncias distintas testadas. Elas foram divididas em cinco escalas comumente utilizadas em MDS: Escala 1/500, Equidistância Vertical (EQ): 0,5 metros; Escala 1/1.000, EQ: 1,0 metro; Escala 1/10.000, EQ: 5,0 metros; Escala 1/25.000, EQ: 10,0 metros; Escala 1/50.000, EQ: 20,0 metros.

3.2. Análise da eficiência do Elipsoide de Incertezas (EPSI) utilizando um estudo de caso

Para avaliar a eficiência do método proposto, realizou-se a avaliação da qualidade posicional de um modelo digital de superfície (MDS), obtido a partir de pares estereoscópicos do sensor PRISM do satélite ALOS.

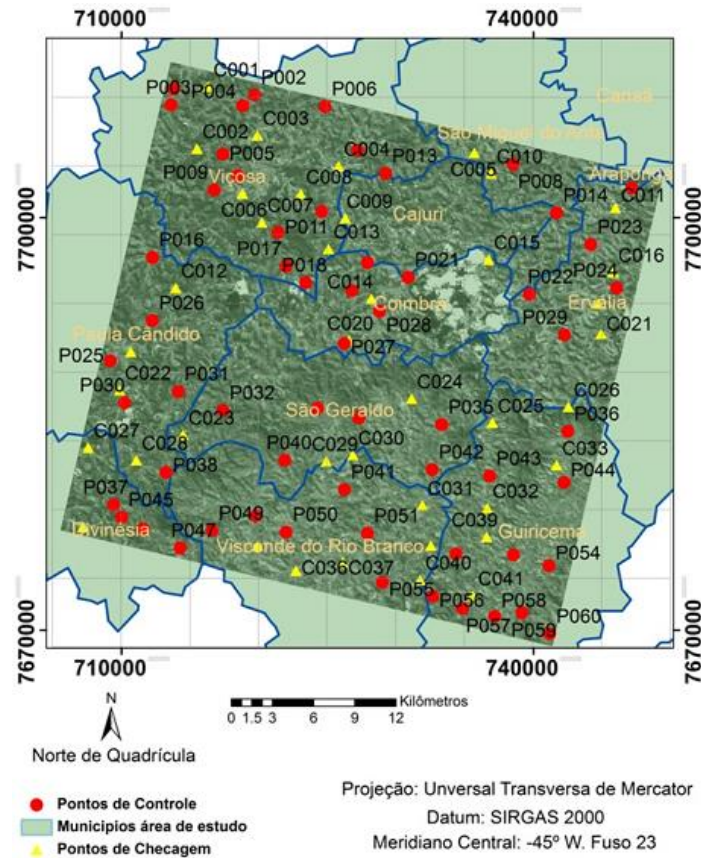
Segundo Jaxa (2018), o sensor PRISM possui três sistemas óticos CCD de visualização simultâneas, sendo um deles a nadir, outro inclinado +24° para frente (*forward*) e o último inclinado -24° para trás (*backward*). Essa combinação possibilita a aquisição de pares estereoscópicos ao longo de sua trajetória e gera MDS com acurácia altimétrica de, aproximadamente, um metro.

Para este exemplo, utilizou-se um MDS híbrido, gerado por Egg et al. (2013), utilizando pares estereoscópicos da combinação das diferentes visadas do sensor PRISM, nadir (N), frente ou vante (F) e atrás ou ré (B). Foram utilizados 30 pontos de referência em campo, obtidos com receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de dupla frequência. Os pontos de referência foram processados no sistema geodésico WGS84, projeção UTM - fuso 23 Sul.

A área de estudo compreende aproximadamente 1.230 km², entre os municípios mineiros: Araponga, Cajuri, Canaã, Coimbra, Divinésia, Ervália,

Guiricema, Paula Cândido, São Geraldo, São Miguel do Anta, Viçosa e Visconde do Rio Branco, conforme Figura 6.

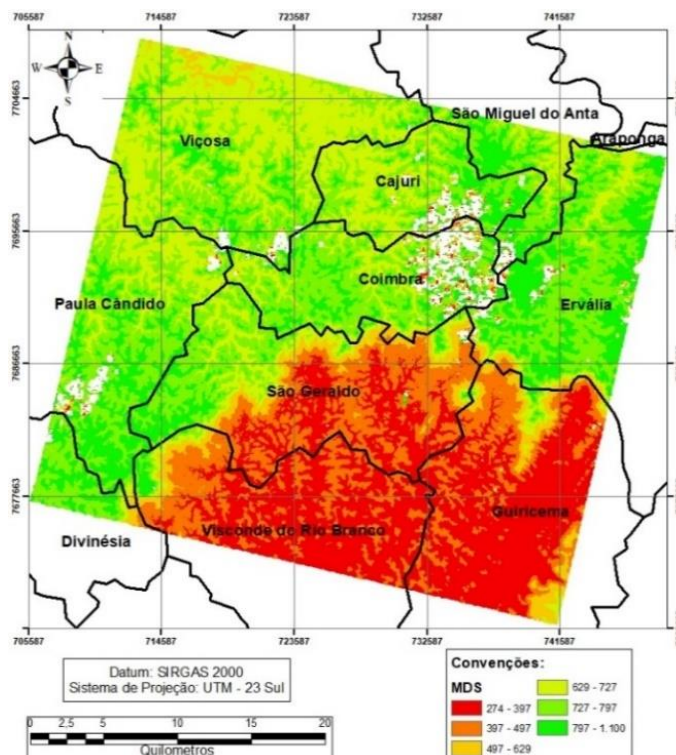
Figura 6 - Espacialização dos pontos de controle e referência na imagem



Fonte: Egg et al. (2013).

A Figura 7 ilustra o MDS híbrido gerado com base no estudo de Egg et al (2013).

Figura 7 – MDS híbrido



Fonte: Adaptada de Egg et al. (2013).

As regiões com tonalidade branca no MDS são locais com excesso de nuvens, o que impossibilita a geração da informação altimétrica. Foram utilizados 19 pontos de checagem para verificar a qualidade posicional do produto cartográfico tridimensional.

Primeiramente, foram calculadas as discrepâncias altimétricas dos pontos de referência, em relação aos pontos homólogos no MDS. Para a avaliação da planimetria, utilizou-se a ortoimagem, gerada pelo MDS e pela imagem (visada nadir) do sensor PRISM.

Em seguida, as discrepâncias passaram pela análise de *outliers*, com aplicação do teste 3σ , e pela análise de tendência, por meio do teste *t* de Student.

Assim como os resultados obtidos no estudo de Egg et al. (2013), o produto cartográfico apresentou Classe A, para a escala de 25.000, em ambos os casos (planimetria e altimetria), o que atesta a qualidade geométrica das

imagens do sensor PRISM, em conformidade também ao apresentado por Jaxa (2018). Ressalta-se que foram utilizados 30 pontos de checagem no trabalho de Egg et al. (2013), enquanto que para este trabalho foram disponibilizados 19 pontos.

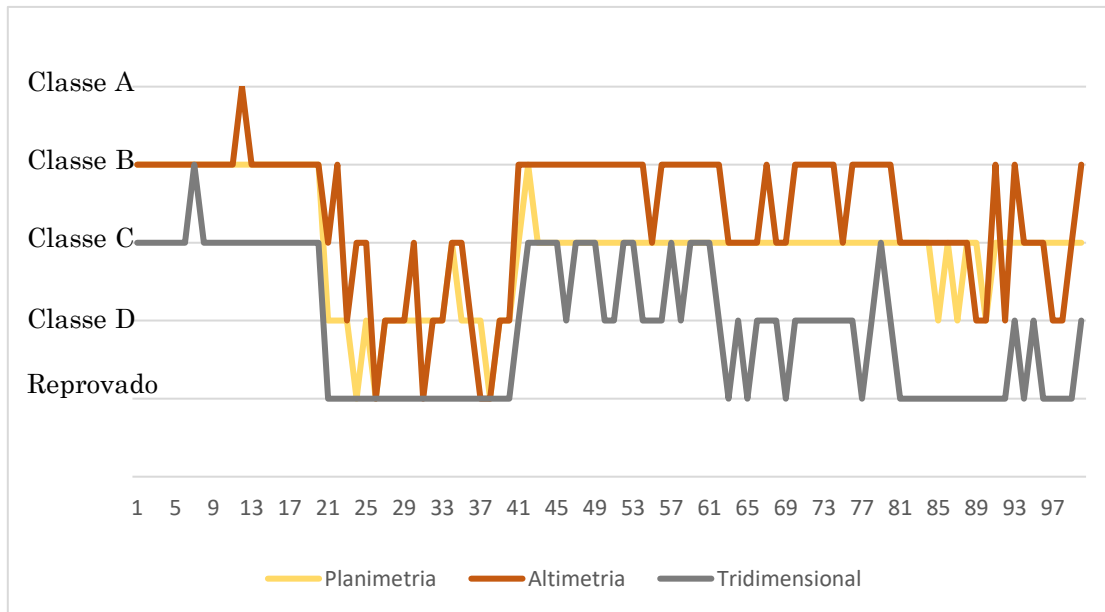
4 Resultados

4.1. Resultados dos dados simulados

Mesmo sabendo que os resultados são discretos, optou-se por representar os resultados simulados de forma contínua, onde o eixo das abcissas representa o conjunto de dados simulados, e o eixo das ordenadas, o resultado de sua classificação, conforme ET-CQDG (2016), para avaliação da planimetria e da altimetria, juntamente com a classificação pelo EPSI, para o caso tridimensional. Cabe lembrar que foram testadas cinco classes, sendo que, para cada classe, foram gerados 100 conjuntos de dados, e que cada conjunto de dados possuía 30 discrepâncias, o que totalizou 15.000 discrepâncias distintas testadas.

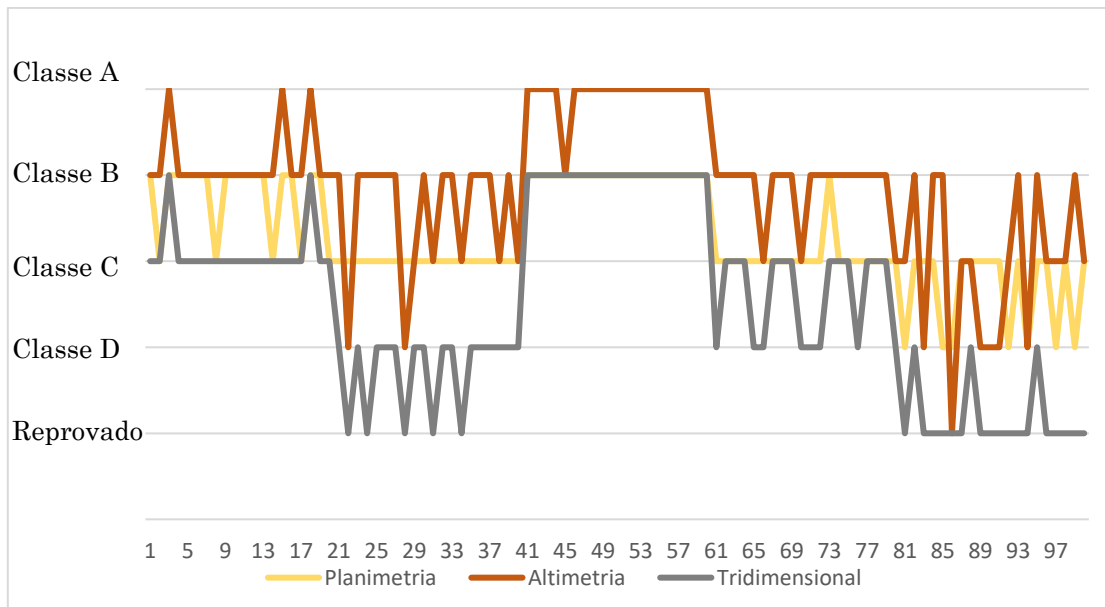
A seguir, nas Figuras 8, 9, 10, 11 e 12 são apresentados os resultados das classificações para os dados simulados, na forma de gráficos, nos quais a linha de cor palha representa os resultados da avaliação da planimetria, a linha marrom representa os resultados da análise da altimetria e a linha cinza representa os resultados da classificação com o Elipsoide de Incertezas.

Figura 8 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/500 e equidistância das curvas de nível de 0,50 metros



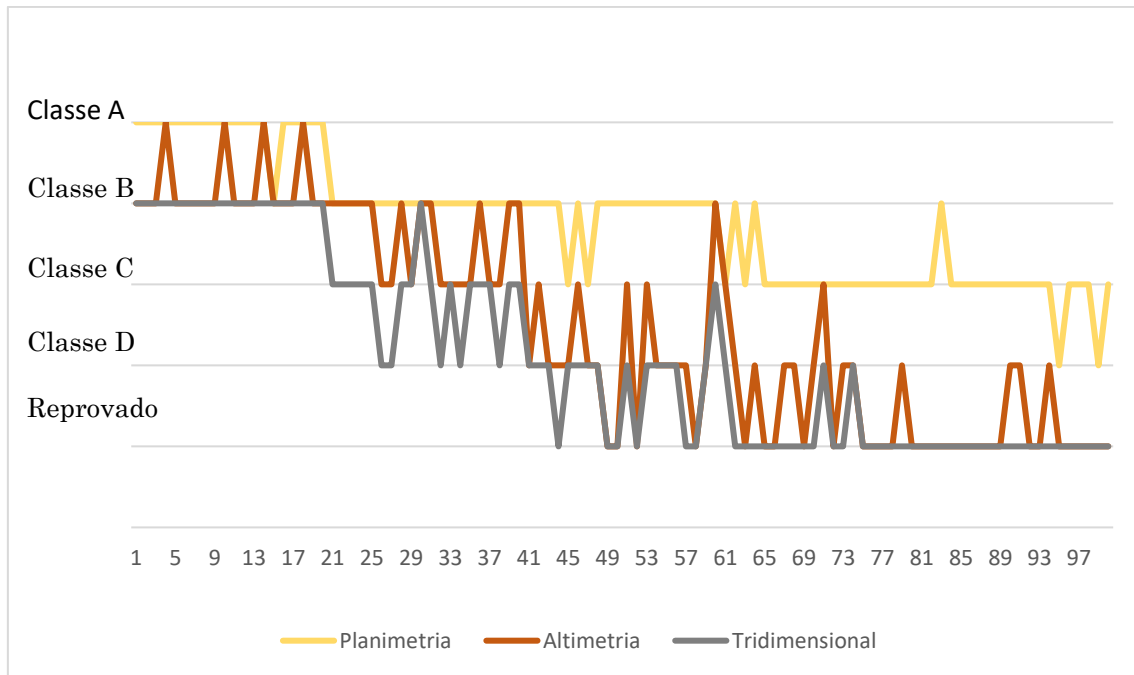
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 9 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/1.000 e equidistância das curvas de nível de 1,0 metro



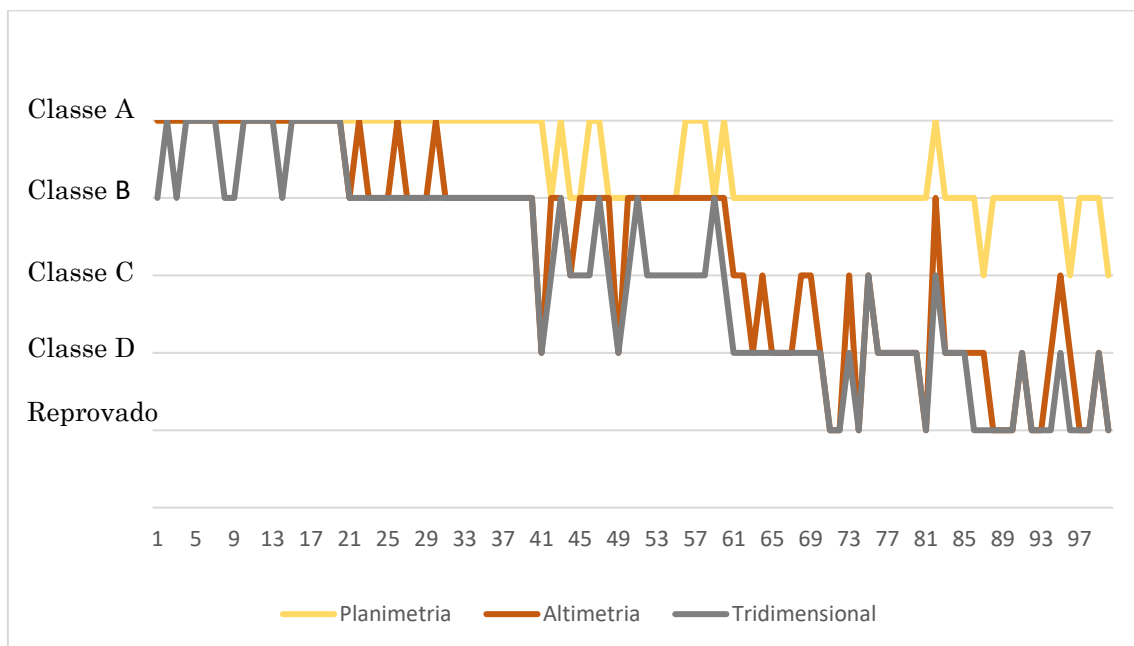
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 10 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/10.000 e equidistância das curvas de nível de 5,0 metros



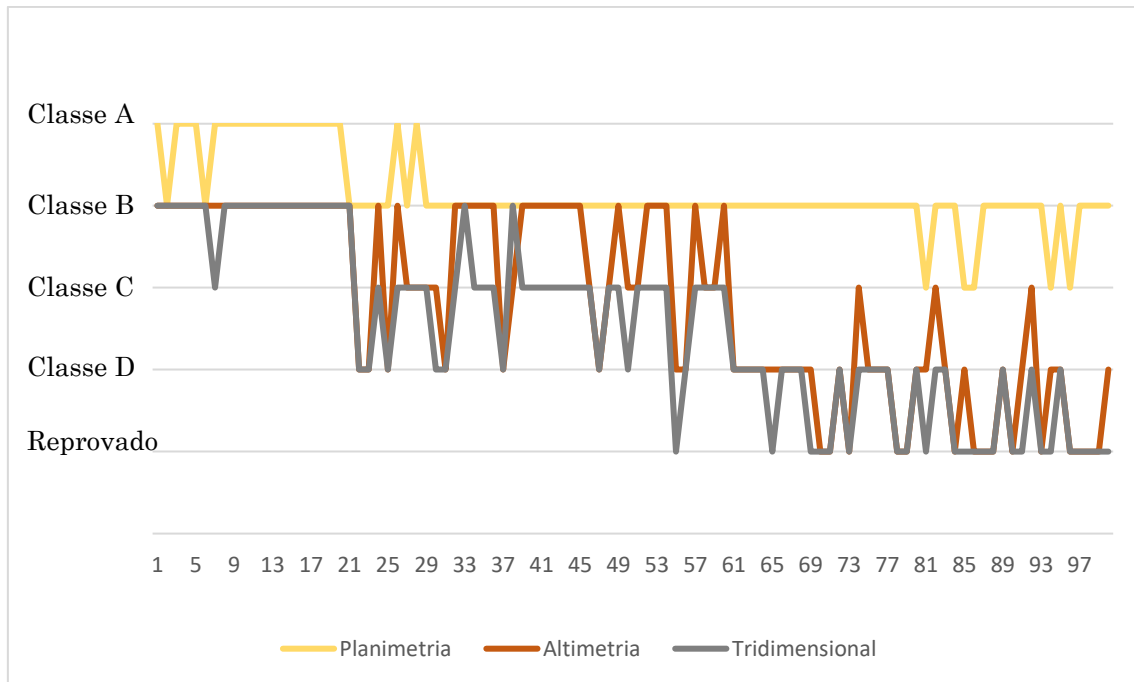
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 11 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/25.000 e equidistância das curvas de nível de 10,0 metros



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 12 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/50.000 e equidistância das curvas de nível de 20,0 metros



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tabela 2 apresenta um resumo quantitativo dos dados simulados. Ao analisar os resultados, em relação à planimetria, percebe-se que o método do EPSI apresentou-se mais restritivo em 83,4% dos casos simulados. Já em relação à altimetria, o EPSI demonstrou-se mais restritivo em 57,8% dos casos. No restante dos casos, o EPSI apresentou a mesma classificação para as duas componentes analisadas (planimetria e altimetria).

Tabela 2 – Resumo dos resultados da classificação para cada escala

Escala	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	Mais Restritivo (%)	Mesma Classificação (%)	Mais Restritivo (%)	Mesma Classificação (%)
1 / 500 - Eq: 0,50 m	62	38	98	2
1 / 1.000 - Eq: 1,00 m	62	38	98	2
1 / 10.000 - Eq: 5,00 m	98	2	38	62
1 / 25.000 - Eq: 10,00 m	98	2	33	67
1 / 50.000 - Eq: 20,00 m	98	2	33	67

Fonte: Elaborada pelos autores.

Verificando os resultados simulados e analisando as equações do modelo proposto (Equação 4 e Equação 5), percebe-se que a classificação feita com base no método em estudo será sempre mais restritiva ou apresentará a mesma classificação que a obtida pelo método tradicionalmente utilizado. Isso indica que, ao utilizar o EPSI em um produto cartográfico tridimensional, sua classificação nunca será inferior à obtida pelo método estabelecido pelas normas brasileiras.

Porém, é necessário se atentar ao fato de as tolerâncias planimétrica e altimétrica serem compatíveis ao tipo do produto. Em casos em que a escala e a equidistância das curvas de nível não são compatíveis ao produto testado, os resultados tendem a seguir o comportamento da tolerância de maior peso.

Para avaliar o peso das tolerâncias utilizadas, elaborou-se uma tabela que apresenta uma relação entre a tolerância planimétrica e a altimétrica (tol_{2D}/tol_z). Para isso, dividiu-se a tolerância planimétrica pela tolerância altimétrica, para a classe A de todas as escalas estudadas. Na tabela 3 estão apresentados os resultados dessa relação.

Tabela 3 - Relação entre as tolerâncias planimétricas e altimétricas

ESCALA	Equidistância das curvas de nível (m)	PEC _{Plan} (m)	EP _{Plan} (m)	PEC _{Alt} (m)	EP _{Alt} (m)	PEC _{Plan} / PEC _{Alt}	EP _{Plan} / EP _{Alt}
1/500	0,5	0,14	0,09	0,14	0,08	1,0	1,0
1/1.000	1,0	0,28	0,17	0,27	0,17	1,0	1,0
1/10.000	5,0	2,80	1,70	1,35	0,83	2,1	2,0
1/25.000	10,0	7,00	4,25	2,70	1,67	2,6	2,6
1/50.000	20,0	14,00	8,50	5,40	3,33	2,6	2,6

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao verificar os resultados da Tabela 3, percebe-se que, para as maiores escalas testadas (1/500 – EQ: 0,50 m e 1/1.000 – EQ: 1,00 m), as tolerâncias apresentaram uma relação de 1 para 1, ou seja, a tolerância planimétrica e a altimétrica apresentam o mesmo peso na classificação. Já para escalas

menores (1/10.000 – EQ: 5,00 m; 1/25.000 – EQ: 10,00 m; 1/50.000 – EQ: 20,00 m), a relação entre as tolerâncias praticamente dobra, apresentando-se como aproximadamente 2 (dois) para 1 (um), ou seja, a tolerância altimétrica é metade da tolerância planimétrica, aproximadamente.

Com isso, percebe-se que para escalas maiores, mesmo que a relação entre as tolerâncias seja equivalente, a classificação com o EPSI se mostrou mais restritiva para a avaliação da altimetria que para a da planimetria. Já os resultados das escalas menores apresentaram comportamento contrário, visto que os resultados da classificação da altimetria, utilizando o EPSI, mostraram-se similares aos resultados obtidos com a análise dessa componente orientada pela norma ET-CQDG (DSG, 2016). Isso se dá pelo fato de o método do EPSI utilizar as tolerâncias como grandezas inversamente proporcionais, de forma que a menor tolerância exerce maior influência no resultado, fazendo com que a influência da altimetria fosse maior para as menores escalas testadas.

4.2 Resultados do estudo de caso

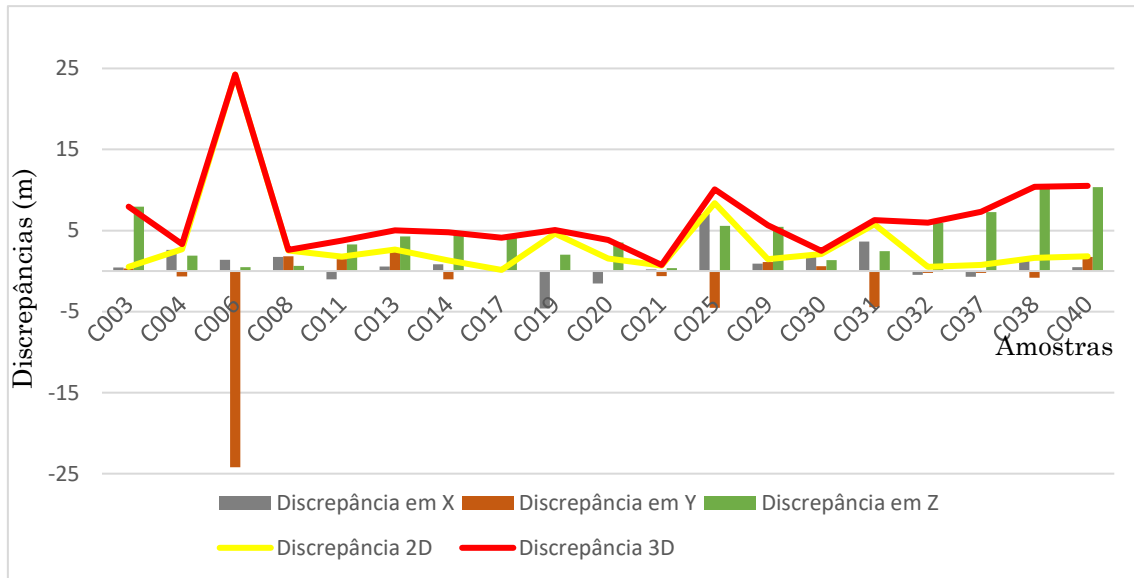
A partir dos dados de Egg et al. (2013), realizou-se a classificação do MDS composto e da ortoimagem proveniente do sensor PRISM, utilizando a metodologia da ET-CQDG (DSG, 2016) e o método proposto do EPSI.

Para avaliar a qualidade desse produto, utilizaram-se 19 pontos de checagem, distribuídos no MDS e na ortoimagem. Primeiramente, foram calculadas as discrepâncias entre os pontos de teste na imagem e seus homólogos de referência levantados em campo. Na Figura 13, estão apresentadas as discrepâncias calculadas, bem como a resultante planimétrica (Equação 6) e a tridimensional (Equação 7).

$$d_{2Di} = \sqrt{(X_i - X_{0i})^2 + (Y_i - Y_{0i})^2} \quad (6)$$

$$d_{3Di} = \sqrt{(X_i - X_{0i})^2 + (Y_i - Y_{0i})^2 + (Z_i - Z_{0i})^2} \quad (7)$$

Figura 13 - Discrepância dos pontos de checagem do Estudo de Caso



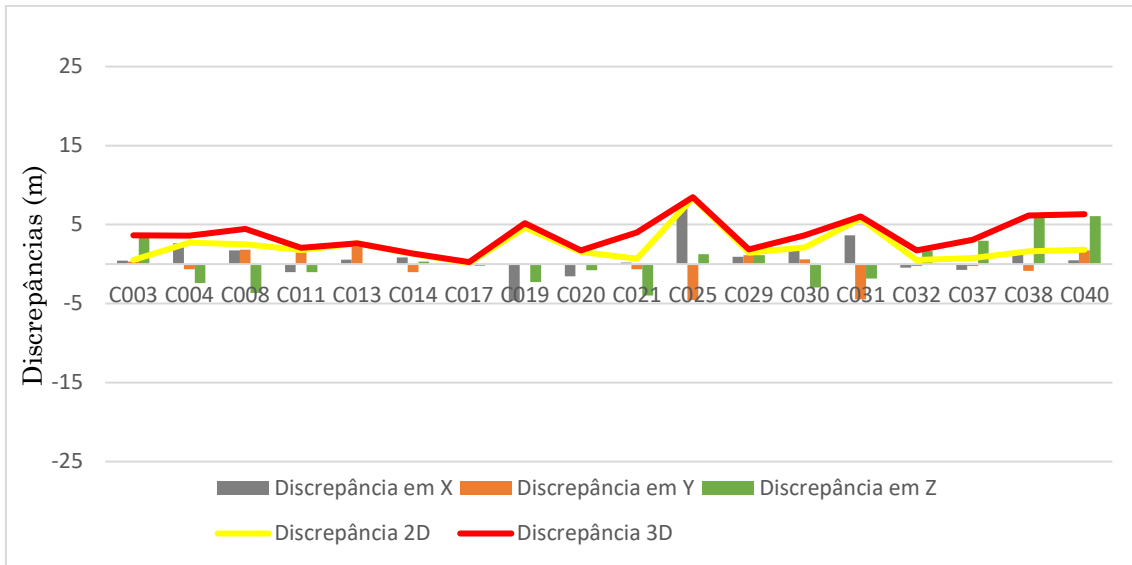
Fonte: Elaborada pelos autores.

O produto apresentou média de 0,787 metros na direção X, discrepância média de -1,423 metros em Y e média das discrepâncias de 4,304 metros em Z. O RMS das amostras de discrepâncias nas componentes X, Y e Z foi igual a 2,388 metros, 5,830 metros e 5,233 metros, respectivamente.

Com as discrepâncias calculadas, aplicou-se o teste de detecção de *outlier*, a partir do que foi identificado um *outlier* planimétrico (ponto C006), eliminado do conjunto de amostras.

Em seguida, aplicou-se o teste de detecção de tendência dos dados, descrito por Merchant (1982), a um nível de confiança de 90%. Não foi identificada tendência das componentes planimétricas, porém foi apontado um efeito sistemático nas discrepâncias altimétricas ($t_{tab}=1,734$; $t_{calc}=6,136$). Para sanar tal situação, realizou-se a translação das coordenadas de teste, com módulo igual à média das discrepâncias altimétricas e em sentido oposto, ou seja, foi somada a componente altimétrica a -5,233 metros. Na Figura 14, estão apresentadas as discrepâncias finais.

Figura 14 - Discrepância dos pontos de checagem do Estudo de Caso



Fonte: Elaborada pelos autores.

Com as correções, o produto apresentou média das discrepâncias em X igual a 0,754 metros, discrepância média na componente Y igual a -0,157 metros e média das discrepâncias em Z igual a 0,213 metros. O RMS amostra das componentes X, Y e Z foi igual a 2,433 metros, 1,827 metros e 2,920 metros, respectivamente.

De posse das discrepâncias corrigidas, realizou-se a classificação do produto para escala de 1/50.000 - EQ: 20 m; escala de 1/25.000 - EQ: 10 metros e escala 1/10.000 - EQ: 5 metros, segundo as metodologias do EPSI e da ET-CQDG (DSG, 2016). No Quadro 1, estão apresentados os resultados da classificação para as referidas escalas.

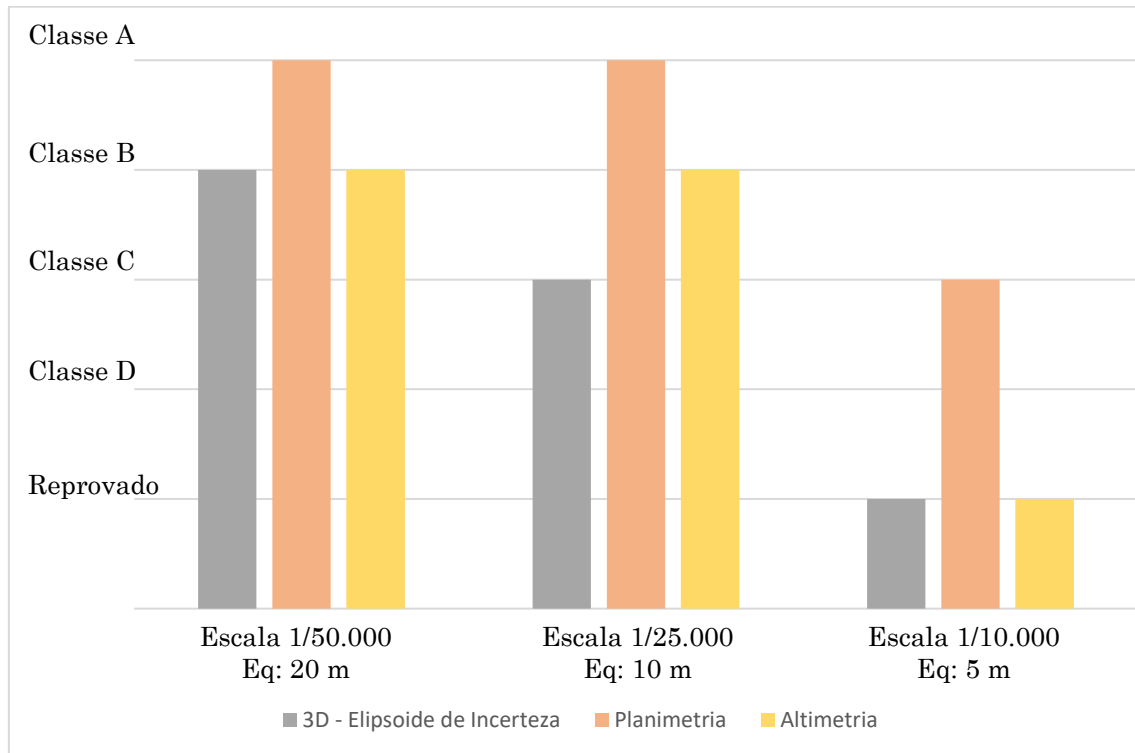
Quadro 1 – Resultado das classificações

Escala	Equidistância das Curvas de Nível (m)	Classificação EPSI	Classificação ET-CQDG	
			Planimetria	Altimetria
1 / 50.000	20	Classe B	Classe A	Classe B
1 / 25.000	10	Classe C	Classe A	Classe B
1 / 10.000	5	Reprovado	Classe C	Reprovado

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para melhor interpretação dos resultados, elaborou-se um gráfico, apresentado na Figura 15, contendo um resumo das classificações obtidas com a aplicação do EPSI e da ET-CQDG (DSG, 2016).

Figura 15 – Resumo das classificações



Fonte: Elaborada pelos autores.

Comparando os resultados apresentados no Quadro 1, percebe-se que, nessas escalas testadas, a classificação da planimetria com base no EPSI se mostrou mais restritiva que a classificação alcançada pela utilização da ET-CQDG (DSG, 2016).

Em relação à altimetria, o modelo proposto apresentou-se mais restritivo em um dos três casos testados (escala 1/25.000-Eq: 10m). Nos outros, a classificação da altimetria por meio da utilização do EPSI e da norma ET-CQDG (DSG, 2016) foram similares, o que acontece pelo fato de, para estas escalas, a tolerância altimétrica ser metade da tolerância planimétrica (Tabela 2): como o modelo é inversamente proporcional, a tolerância altimétrica influencia mais nos resultados que a tolerância planimétrica.

5 Conclusão

Ao utilizar o método do EPSI, é possível avaliar como um todo as três componentes de um produto (planimetria: X e Y; e altimetria: Z), o que o torna ideal para a avaliação de modelos tridimensionais, pois utiliza simultaneamente pontos homólogos na planimetria e na altimetria.

Analisando o método do EPSI, percebe-se que ele sempre será mais restritivo que a metodologia usualmente aplicada (que avalia separadamente a planimetria e a altimetria) ou apresentará a mesma classificação. Isto pode ser explicado pelas Equações 4 e 5, que regem o método proposto, as quais levam em consideração a menor tolerância, ou seja, a tolerância mais restritiva influenciará mais nos resultados, trazendo maior rigor à classificação.

Pelos resultados, pode-se comparar o método proposto do EPSI com a metodologia de classificação da ET-CQDG (DSG, 2016). Em todos os casos, o EPSI se mostrou mais restritivo de alguma forma, porém, para escalas maiores, o EPSI apresentou classificação planimétrica similar à obtida pela utilização da metodologia da ET-CQDG (DSG, 2016). Já para escalas menores, o EPSI demonstrou-se mais influenciado pela altimetria, devido à diferença na relação entre a tolerância planimétrica e a altimétrica. Em escalas maiores, a tolerância altimétrica é metade da tolerância planimétrica, para escalas maiores, acontece o contrário.

Deve-se salientar que a utilização do EPSI requer que as amostras de checagem estejam livres de *outliers* e efeitos sistemáticos. Além disso, vale ressaltar que, para a avaliação da acurácia posicional tridimensional, são necessários pontos de referência tridimensionais (X, Y e Z), com a utilização das técnicas de posicionamento GNSS, associadas a técnicas de nivelamento, ou a utilização de modelos de ondulação geoidal, para que seja possível a obtenção da altitude normal dos pontos de referência.

Contribuição dos Autores

Neste presente artigo os autores Matheus Henrique Maia Lisboa, Afonso de Paula dos Santos e Nilcilene das Graças Medeiros estabeleceram a metodologia, a organização, procedimentos e métodos a serem utilizados. A coleta de dados em campo e seu processamento, através dos softwares Matlab, R, formatação em planilhas eletrônicas e geração dos gráficos ficou a responsabilidade do autor Matheus Henrique Maia Lisboa. A análise e discussão dos resultados, bem como a elaboração do texto, foi realizada pelos quatro autores, Matheus Henrique Maia Lisboa, Afonso de Paula dos Santos, Nilcilene das Graças Medeiros e Marcos Vinicius Sanches Abreu.

Referências

- BRASIL, Decreto nº 89.817/84, de 20 de junho de 1984. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília, **Diário Oficial da União**, Brasil, 22 de julho 1984.
- DSG, Diretoria do Serviço Geográfico. **ET-ADGV: Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais**. 2 ed. Brasília: DSG, 2015.
- DSG, Diretoria do Serviço Geográfico. **ET-CQDG: Norma da Especificação Técnica Para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais**. 1 ed. Brasília: DSG, 2016.
- EGG, G. C.; JR GRIPP, J.; MEDEIROS, N. G. Geração de modelos digitais de superfície compostos utilizando imagens do sensor Prism/Alos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 5, n. 65, 2013, pp. 951-966.
- FERREIRA, G. F. **Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC-PCD**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2014, 121 p.
- ISO 19157: **Geographic Information - Data Quality**. International Organization for Standardization, 2011.

- JAXA, Japan Aerospace Exploration. Site <www.global.jaxa.jp>, Acesso em julho de 2018.
- MATLAB: MATrix LABoratory. Version R 2012b [S.l.]: MathWorks Inc. 2012. Acesso em 10 de Dezembro de 2017.
- MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale of maps. Proceedings of the technical congress on surveying and mapping, v. 1, n. 1, 1982, pp. 222-231.
- MOZAS, A. T. ARIZA, F. J. **Detection of systematic displacements in spatial database using linear elements. Cartography and Geographic Information Science**, v. 41, n. 4, 2014. pp. 309-322.
- MOZAS, A. T.; ARIZA, F. J. New method for positional quality control in cartography based on lines. A comparative study of methodologies. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 25, n. 10, 2011, pp. 1681-1695.
- NERO, M. A. **Proposta para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005, 186 p.
- R. R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Site <<https://www.R-project.org/>>, acessado em outubro de 2017.
- SANTOS, A. P. MEDEIROS, N. G. SANTOS, G. R. RODRIGUES, D. D. Avaliação da acurácia posicional planimétrica em modelos digitais de superfície com o uso de feições lineares. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, 2016. pp. 157-174.
- SHI, W. LIU, W. A stochastic process-based model for the positional error of line segments in GIS. **Int. J. Geographical Information Science**, vol. 14, n. 1, 2000, pp. 51-66.
- TONG, X. SUN, T. FAN, J. GOODCHILD, M, F. SHI, W. A statistical simulation model for positional error of line features in Geographic Information Systems (GIS). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n 21, 2013, pp. 136-148.