

CLASSIFICAÇÃO DE MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO COM IMAGENS DE CÂMERAS DIGITAIS NÃO-MÉTRICAS PARA FINS DE PROJETOS DE ESTRADAS

Classification of aerial photogrammetric mapping with non-metric digital camera images for the purpose of road projects

Glauber Carvalho Costa¹
Daniel Carneiro da Silva²

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Departamento de Engenharia Cartográfica

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - 2º andar – DEPART – Cidade Universitária, CEP 50740-530 – Recife/PE

glaubercad@bol.com.br¹

danielcs@ufpe.br²

RESUMO

Faltam de modo generalizado produtos atualizados cartográficos em todo o Brasil, principalmente nas escalas médias e grandes, que são as mais adequadas ao planejamento, estudos e projetos preliminares de diversas obras de engenharia. Por outro lado há uma crescente disponibilidade de tecnologias de baixo custo, que podem ser adaptadas para atender àquela demanda, e que são viáveis técnica e economicamente em várias situações. Com este objetivo foi desenvolvido e testado um sistema com câmera digital de pequeno formato aerotransportado para mapeamentos rápidos de pequenas áreas. Neste trabalho, são apresentados a descrição do sistema, detalhes sobre a tomada das imagens e a análise estatística com o objetivo de classificar a precisão e acurácia do produto cartográfico, de um aerolevante destinado a projeto de estrada. As imagens utilizadas no processamento fotogramétrico foram obtidas com câmeras digitais não-métricas de uma área localizada ao Norte do litoral do Estado de Pernambuco, no trecho da BR-101, entre os quilômetros 19 e 20. Para viabilizar os testes de precisão e acurácia, foram implantados marcos planialtimétricos pré-sinalizados, destinados a pontos de checagem e apoio à aerotriangulação. Os pontos de checagem foram utilizados para a verificação dos erros planimétricos e altimétricos e foram coletados com receptores GPS geodésicos e nível eletrônico. Os testes estatísticos permitiram a avaliação da acurácia e precisão, e demonstraram que são eficientes para validação da qualidade posicional das bases cartográficas, além de fornecer subsídios para a classificação de produtos cartográficos conforme a norma brasileira vigente.

Palavras chaves: Câmera não-métrica, projetos de estradas, aerofotogrametria.

ABSTRACT

There is a generalized lack of updated cartographic products, mainly in medium and large scales, which are the most appropriate for planning, studies and preliminary projects of many engineering works. On the other hand there is a raising availability of low cost technology, which can be adapted to attend those demands and are technically and economically viable in many different situations. With this objective, a system that uses a small digital camera has been developed and tested to quick mapping of small areas. In this work the description of the system is presented, along with details of the photo shooting and the statistical analysis with the objective of classifying the precision and accuracy of the cartographical product of a aerial survey for road designing. The images used in the photogrammetric processing were obtained with non-metric digital cameras, of an area at North of the Pernambuco State, between the kilometers 19 and 20 of the BR-101. In order to make the precision and accuracy tests, pre-marked planimetry and altimetry landmarks were placed for use in checking points, as well as the support to aerial triangulation. The checking points were used for the verification of planimetry and altimetry errors and were collected using GPS receivers and electronic level. The statistical tests allowed to evaluate the accuracy and precision, and showed they are efficiency in validating the quality of the geospacial data, as well as providing ways to classify cartographic products according to the current Brazilian norms.

Keywords: Non-metric camera, Road projects, Aerial Photogrammetry.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas empregados em levantamentos aerofotogramétricos convencionais, constituídos por câmaras analógicas e digitais, sistemas inerciais e de navegação, e recursos computacionais e humanos necessários às etapas de processamento das imagens, são de custo elevado, que inviabilizam o emprego dessas tecnologias para algumas aplicações na engenharia (PIOVESAN et al, 2004; HASEGAWA et al, 2004; SILVA, 2006).

A aerofotogrametria tem sido usada no Brasil em apoio ao estudo de definição de traçado de sistemas viários e no detalhamento de projetos finais de estradas e ferrovias, mas com o advento de novas tecnologias, sobretudo com o desenvolvimento da fotogrametria digital, observou-se a necessidade de realizar-se uma revisão de procedimentos antigos.

Com as novas tecnologias, detectou-se um significativo desenvolvimento da aerofotogrametria digital convencional, bem como a criação de sistemas de imageamento aéreo digital de baixo custo. A utilização de imagens aéreas, obtidas de câmaras digitais não-métricas, é uma alternativa tecnológica que apresenta um custo viável às aplicações em aerolevamentos para fins de estudos ambientais, anteprojetos de rodovias e em outras aplicações na engenharia. Existem até em alguns países orientações e especificações para o uso deste tipo de câmaras em levantamentos (NJDOT, 2009; ILMB, 2007).

Empresas americanas e européias utilizam sistemas de imageamento aéreo de baixo custo, compostos por dispositivos de acoplagem a aeromodelos e aeronaves convencionais como helicópteros e aviões pequenos, utilizando câmeras não-métricas previamente calibradas. Os resultados das precisões posicionais são compatíveis com várias aplicações nas engenharias, e com levantamentos de áreas pequenas e estudos emergenciais (MENESE et al, 2008; RUY et al, 2007).

Entretanto, além da aquisição, igualmente se faz necessário que as imagens também tenham um processamento fotogramétrico de baixo custo que mantenham a precisão e qualidade requeridas nos padrões das normas oficiais. No Brasil, as normas que definem as especificações para elaboração de projetos rodoviários são oriundas de órgãos estaduais, como os DER (Departamento Estadual de Estradas de Rodagem), ou federal, como o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT).

Este trabalho detalha a execução de mapeamento aerofotogramétrico, utilizando imagens de câmeras não-métricas, e analisa a precisão e a acurácia posicional em relação às escalas empregadas em estudos de projetos rodoviários. Dentre os procedimentos de aquisição das imagens e de apoio de campo, que tem significativa influência na precisão final necessária para projetos de estradas, destaca-se o emprego da pré-sinalização de marcos de checagem e de apoio a

fototriangulação, que foi usado neste projeto. Também foram estudados e testados procedimentos que permitem avaliar a qualidade posicional dos documentos cartográficos produzidos, com o emprego de análise estatística e comparações com os dados de levantamentos topográficos convencionais.

2. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS AÉREAS E O PROCESSAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

Os critérios mais importantes para a escolha da área teste foi a heterogeneidade da topografia, de ondulada e plana; a disponibilidade de apoio logístico necessário aos levantamentos; e fácil acesso à banco de dados geodésicos existentes. A realização do aerolevamento obedeceu a sistemática apresentada no fluxograma da Figura 1.

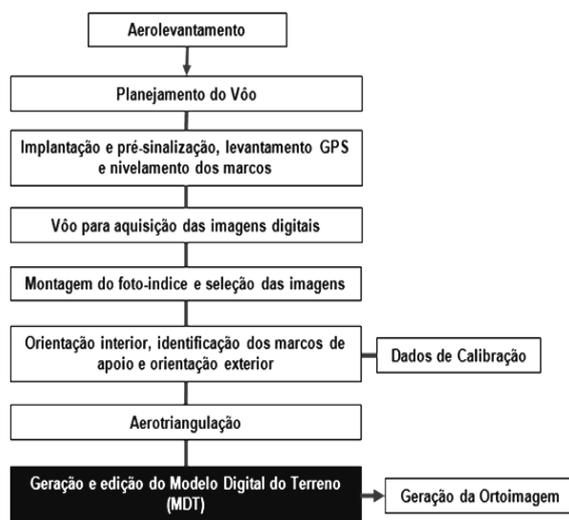


Fig. 1 – Fluxograma do aerolevamento.

As fotografias aéreas digitais foram obtidas com o auxílio de uma aeronave modelo EMB-820C, na qual foi instalado o equipamento de imageamento, composto por uma base de montagem, câmara digital, e computador para controle dos disparos e auxílio à navegação. A câmara digital é uma Canon modelo A-640, com resolução de 3648 x 2736 pixels e distância focal de 7.35 mm, previamente calibrada.

Definida a escala cartográfica de 1:2000 para o produto final, a velocidade da aeronave e com os dados de calibração da câmara, foram calculados os demais parâmetros do plano de voo (Tabela 1).

Para cobrir a área do projeto seria necessária apenas uma única faixa de voo, pois a mesma teria uma largura superior à faixa de domínio de 80m, que é o suficiente para os estudos de projetos viários. Entretanto foram previstas três faixas de voo para fosse possível também verificar os resultados de ajustamento da fototriangulação em bloco. Adicionalmente, para auxiliar à navegação dessas faixas, foram calculadas as coordenadas de entrada e saída e mais dois pontos extras em cada uma.

Tabela 1 – Dados do planejamento de voo.

Velocidade de Vôo	150 km/h	
Altitude de Vôo	740 m	
Intervalo de Tomada das Imagens	4 seg.	
Recobrimento Longitudinal	60%	
Recobrimento Transversal	30%	
Extensão no terreno	Longitudinal	510 m
	Transversal	680 m
Resolução (Distância amostral do terreno)	0,19 m	
Escala Cartográfica da Restituição	1:2.000	

Antes do voo foram implementados e pré-sinalizados (Figura 2) 43 marcos planialtimétricos. Os marcos foram levantados com receptores GPS e nível eletrônico. As alturas geométricas obtidas com GPS foram convertidas para geométricas e as coordenadas foram usadas como pontos de apoio à aerotriangulação e para checagem.

A pré-sinalização não é um procedimento usual na aerofotogrametria no Brasil devido ao elevado custo, e requerer muito tempo para sua execução, embora seja uma prática obrigatória em outros países em aerolevantamentos destinadas à execução de projetos viários e levantamentos de maior precisão. Mais detalhes podem ser encontrados em normas como, por exemplos, do Departamento de Transportes do Estado de New Jersey nos Estados Unidos (NJDOT, 2009) e do Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano (US ARMY, 2002). A pré-sinalização foi prevista nesse trabalho para garantir um melhor controle posicional dos produtos a serem testados e também por que a área não dispõe de pontos naturais bem identificáveis, já que é coberta com a monocultura de cana de açúcar.

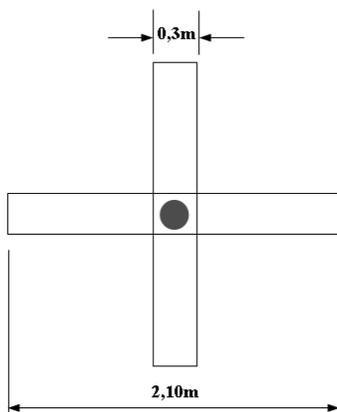


Fig. 2 – Pré-sinalização dos Marcos.

Para apoio à navegação aérea foi utilizado um receptor GPS Garmin, modelo GPSMAP 276C, com antena conectada ao pára-brisa frontal da aeronave, de modo que o piloto pudesse visualizar as faixas de voo planejadas e o curso em tempo real, e proceder às correções necessárias da rota. As coordenadas de

posicionamento absoluto durante o voo eram registradas pelo receptor GPS em intervalos de dois segundos.

A câmera foi montada em um suporte acoplado na abertura da porta esquerda da aeronave (Figura 3). O controle do acionamento da câmera é formado por um sistema remoto, conectado a um computador portátil por um cabo de comunicação, e software desenvolvido especialmente para esse estudo. Para o acionamento foi calculado intervalos de quatro segundos, de acordo com a velocidade de vôo de 150km/h e da sobreposição longitudinal de 60% das imagens.

Após a coleta das imagens foram processados os dados para montagem de foto-índice com a organização das faixas, seguido pelo identificação e medições dos pontos apoio, checagem, e ligação de modelos; e, finalmente o cálculo de ajustamento da aerotriangulação. As coordenadas obtidas pela aerotriangulação para os pontos de checagem, foram usadas nos testes da seção a seguir.

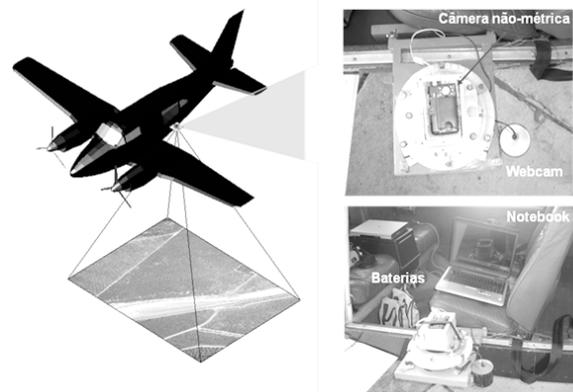


Fig. 3 – Disposição dos equipamentos montados na aeronave e adotados no aerolevantamento.

3. ASPECTOS IMPORTANTES EM RELAÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DE CARTAS

No Brasil a exatidão dos documentos cartográficos utiliza o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), regulamentado pelo Decreto Lei Nº 89.817/84. Esse Decreto estabelece, em seu Artigo 80, que "90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica estabelecido", o que deixa implícito que deve ser usado o critério da proporção amostral simples para se alcançar o percentual estabelecido. No entanto, a proporção amostral simples enquanto critério de avaliação, é considerado rígido, motivando assim alguns autores como (ITAME, 2001; ZANARDI, 2006) a sugerirem a adoção de outros critérios mais flexíveis e mais bem definidos, para classificação dos dados cartográficos, o que foi seguido no presente trabalho.

Embora o PEC não seja especificado para grandes escalas, o seu uso é generalizado, e é adotado pelo DNIT para definição de parâmetros de aceitação ou

rejeição dos levantamentos aerofotogramétricos para elaboração de projetos de rodovias. No seu manual de diretrizes básicas de 2006, as instruções de serviço da IS-226 e da IS-227 especificam os critérios de análise de precisão, que são os mesmos adotados no Decreto Lei Nº 89.817/84 para definição do PEC.

Os parâmetros do PEC para planimetria são equivalentes aos adotados em outros países, como os de normas americanas (National Map Accuracy Standard – NMAS), publicada em 1947, que adotam o erro gráfico de desenho analógico como referência, todavia, hoje, não são adequados para aferirem os produtos cartográficos resultantes de processamento digital. Os produtos planimétricos e altimétricos da aerofotogrametria, antes da evolução para os sistemas digitais, eram obtidos mediante à utilização de estereorestituidores analógicos, atualmente em crescente desuso.

A precisão desses instrumentos tem relações com o intervalo máximo entre as curvas de nível (ICN), que é parâmetro fundamental na definição do PEC para a altimetria. Para a classificação de cartas no nível A, o PEC é de 1/2 da equidistância entre as curvas de nível. Para ser definido o ICN utiliza-se o chamado Fator C que está associado à ordem de precisão do estereorestituidor analógico. Se ele é de primeira ordem, o Fator C varia de 2000 a 2500; se de segunda, o fator C é cerca de 1800; se de terceira, fator C é cerca de 800 a 1200.

Para um melhor entendimento será dado um exemplo de cálculo de ICN e para isso serão definidos alguns parâmetros. O fator C pode ser igual a 1200, que corresponde a equipamentos de 3ª ordem, que eram os mais usados nas empresas de aerofotogrametria. A escala cartográfica é 1:2.000, que é a mais requisitada em estudos de projetos básicos de rodovias pelo (DNIT, 2006). Para esta escala é usual ampliações das fotografias no máximo em quatro vezes, e assim a escala das fotografias é 1:8.000 e a altura do voo (h) será de 1200m, para uma câmera com distância focal (f) de 150mm. O valor de ICN é:

$$ICN = \frac{\text{altura do voo}}{\text{fator C}} \therefore ICN = \frac{1.200}{1.200} \therefore ICN = 1,00m \quad (1)$$

Logo, para trabalhos de levantamento aerofotogramétrico, com escala cartográfica final de 1:2.000, podem ser utilizadas curvas de nível de 1 em 1 metro. Este intervalo é exatamente o aceito pelo DNIT (DNIT, 2006) para a escala de 1:2.000.

4. ESPECIFICAÇÕES DE PRECISÃO PARA ALTIMETRIA E PLANIMETRIA

O uso de aerofotogrametria convencional para projetos de estradas tem uso extensivo em vários países do mundo e conta com especificações de precisão bem detalhadas, como por exemplo, no Departamento de Transportes e Administração de Estradas Federais dos Estados Unidos (FHA, 2008), ou a administração de estradas do Estado de Western Austrália (MAIN ROADS, 2002). Aqui no Brasil as normas do DNIT definem as diretrizes básicas para elaboração de levantamento aerofotogramétrico para projetos básicos e executivos, incluindo as escalas cartográficas exigidas para cada fase de projeto, e os intervalos das curvas de nível.

As especificações de levantamentos aerofotogramétricos para estradas diferem do mapeamento comum, de modo geral, apenas no maior cuidado com as precisões da altimetria, uso de escalas grandes das fotografias e tamanho de pixel no terreno que varia de 5 a 20cm. Neste sentido como a aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato tem sido pouco empregada em projetos de estradas, serão usados como referência especificações do manual da ILMB (2007) para o mapeamento comum, com fins de comparação com as especificações do Departamento de Estradas de Nova Jérsei nos EUA (NJDOT, 1998).

O ILMB (2007) define que os dados planimétricos para a escala de 1:2500 devem ter uma acurácia de 90% dos pontos bem testados em campo, de 2,10m; e ICN de 2,0m a 4,0m. Na Tabela 2, pode-se visualizar outras escalas e acurácias recomendadas pelo ILMB (2007) para elaboração de bases cartográficas.

Na Tabela 3 estão as tolerâncias estatísticas para planimetria e altimetria para as escalas de mapas 1:1000 e 1:2000 segundo as normas de NJDOT(1998). As especificações incluem além das tolerâncias para os 90% dos pontos testados, como nas normas brasileiras, os limites para os 10% restantes. As tolerâncias em metros referem-se às distâncias às posições reais planimétricas ou à cota real na altimetria.

O Departamento de Transportes e Administração de Estradas Federais dos Estados Unidos (FHA, 2008) recomenda o uso de equipamentos de restituição de segunda ordem e para escala de voo de 1:5.000, o intervalo de curva de nível é de 0,50m, o que está compatível com os valores da Tabela 3, entretanto é mais rigoroso que o valor especificado pelo DNIT, que é de 1,00m .

Tabela 2 – Escalas e Intervalos de Curvas de Nível recomendados para mapeamento de acordo com os levantamentos aerofotogramétricos (Adaptado do ILMB, 2007).

GSD da câmara	Escala Recomendada para o Mapeamento	Acurácia Horizontal (90% de intervalo de confiança)	EMQ (horizontal)	Intervalo de Curvas de Nível Recomendado
0,10m - 0,250m	1/500	0,42m	0,28m	0,5m a 1,0m
0,20m - 0,500m	1/1.000	0,85m	0,55m	1,0m a 2,0m
0,50m - 1,00m	1/2.500	2,10m	1,40m	2,0m a 4,0m
1,00m - 2,00m	1/5.000	4,20m	2,80m	4,0m a 5,0m

Tabela 3 – Padrões de precisão para mapeamento fotogramétrico (Fonte: adaptado do NJDOT, 1998).

Escala / ICN	Tolerância Planimétrica	Tolerância Altimétrica Curvas de Nível	Tolerância Altimétrica Pontos cotados
1:2.000 / 2,0m	90% dos pontos \leq 1,5m 10% restante \leq 3,0 m	90% do traçado das curvas de nível \leq 1,0m 10% restante \leq 2,0 m	90% dos pontos \leq 0,5m 10% restante \leq 1,0 m
1:1.000 / 1,0m	90% dos pontos \leq 0,75m 10% restante \leq 1,5 m.	90% do traçado das curvas de nível \leq 0,5m 10% restante \leq 1,0 m.	90% dos pontos \leq 0,25m 10% restante \leq 0,5 m

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão analisadas a acurácia e precisão dos dados coletados em campo, tomando-se como base a análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas (E, N) e alturas ortométricas (H), dos pontos de checagem distribuídos conforme indicados na Figura 4. As coordenadas foram obtidas pela aerotriangulação, e coletados em campo por meio de levantamento topográfico convencional e rastreamento via satélite, utilizando-se receptores GPS geodésicos. Em seguida foram confrontadas as discrepâncias e analisados parâmetros de precisão e acurácia pré-estabelecidos conforme a escala e ICN, para verifica sua qualidade dentro de determinado grau de confiança estabelecido pelo Decreto Lei Nº 89.817/84.

O método estatístico utilizado nesse estudo, foi considerado mais adequado à análise que a proporção amostral simples para classificação do produto cartográfico, preconizado pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

Para a análise da acurácia, empregou-se a estimativa intervalar dada pela distribuição t de Student. Este método consiste na construção de um intervalo de confiança de 90% de certeza para a média populacional μ em consonância com a média amostral X e da variância da amostra s^2 , conhecidas. Já para análise da precisão, utilizou-se a estimativa intervalar dada pela distribuição Qui-quadrado (χ^2), que consiste em construir um intervalo de confiança de 90% para a variância populacional σ^2 a partir da variância amostral s^2 (ZANARDI, 2006; ITAME, 2001 E DALMOLIN, 2001).

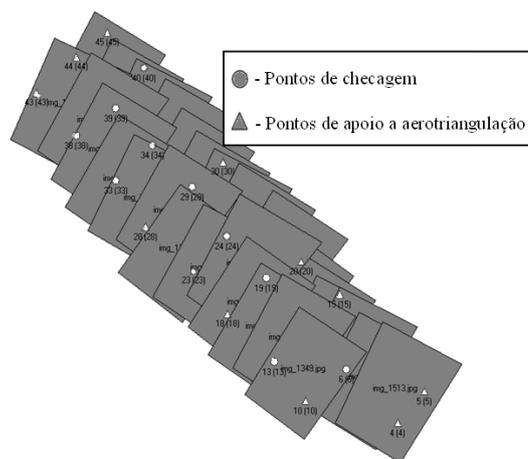


Fig. 4 - Localização dos pontos de checagem e de apoio à aerotriangulação.

As discrepâncias determinadas entre as coordenadas tridimensionais fotogramétricas e levantadas de campo, dos pontos de checagem pré-sinalizados, são as amostras trabalhadas nos teste que se seguem, e apresentadas na Tabela 1. Nas Normas Técnicas da Cartografia Nacional e nas especificações do DNIT, não se estabelece o número de amostras necessárias à classificação dos produtos cartográficos.

Tabela 4 – Discrepâncias entre os dados.

Erros apurados nos Pontos de Checagem				
Pontos De Checagem	Coordenadas Planimétricas		Discrepâncias	
	Este (m)	Norte (m)	Planimetria (absoluta)	Altura Ortométrica (absoluta)
			(m)	(m)
6	-0,251	0,198	0,320	0,080
13	-0,070	-0,167	0,181	0,334
19	0,004	0,189	0,189	0,024
24	-0,116	0,433	0,448	0,168
29	-0,108	0,280	0,300	0,159
33	0,140	0,351	0,378	0,617
34	0,125	0,138	0,186	0,209
38	0,141	-0,201	0,246	0,018
39	0,313	0,214	0,379	0,104
40	-0,178	-0,394	0,432	0,297
Média Amostral (X)			0,306	0,253
Desvio Padrão Amostral (σ)			0,102	0,213

5.1 – Análise da acurácia

5.1.1 – Análise dos dados planimétricos quanto à acurácia

O método de análise da acurácia da planimetria tem início com a construção de um intervalo de confiança de 90% de certeza para uma Média Populacional (μ), obtida através da equação 1 que, nesse estudo, terá $v = 9$ graus de liberdade. A média populacional foi definida em função da Média Amostral $X = 0,306m$ e do Desvio Padrão Amostral $\sigma = 0,102m$, calculados a partir dos resultantes das discrepâncias das coordenadas planimétricas, nos pontos de checagem (coluna 4 da Tabela 4), o valor de t_α foi tirado da tabela t de Student para um intervalo de confiança de 90% dos resultados.

$$\mu \leq X + (t_\alpha) \times \left[\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (1)$$

Tabela 5 – Resumo dos valores adotados no cálculo da média populacional (μ) na análise da acurácia.

Descrição	Valores adotados
Média Amostral (X)	0,306 m
Desvio Padrão Amostral (σ)	0,102 m
Tamanho da Amostra (n)	10
Obtido da tabela estatística t-student (t_α)	1,383
Graus de Liberdade ($v=n-1$)	9

Com os dados necessários ao cálculo da Média Populacional (μ), determinou-se seu valor para um intervalo de confiança de 90%, e obteve-se $\mu \leq 0,351$, conforme mostrado a seguir.

$$\mu \leq 0,306 + (1,383) \times \left[\frac{0,102}{\sqrt{10}} \right] \therefore \mu \leq 0,351m$$

$$t_\alpha = 1,383$$

Segundo Normas Técnicas da Cartografia Nacional para mapas padrão classe A, o erro planimétrico permitido é de 0,5 mm na escala da carta, sendo então de 1,0 m no terreno para a escala 1:2.000. Esse valor na metodologia usada aqui corresponde à maior média possível para um intervalo de confiança de 90%. Finalmente, tem-se que a Média Populacional Amostral (μ) é inferior à Maior Média Possível para o intervalo determinado, ou seja, $\mu = 0,351 m \leq 1,0 m$.

Entretanto, para que o teste proposto seja conclusivo, não basta que o erro máximo permitido (Média Populacional Amostral) seja menor que a Maior Média Possível para o intervalo de confiança de 90%, mas é necessário uma verificação que probabilidade da Média Populacional Amostral (μ) seja menor ou igual a 1,0m.

Para o teste de hipótese com nível de significância de 10%, aplica-se a equação 2 ao confronto-se a hipótese $H_0: \mu \leq 1,0 m$ com a hipótese alternativa $H_1: \mu > 1,0 m$.

$$t = \frac{(X - \mu_0)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (2)$$

Sendo,

$H_0: \mu \leq 1 m$ - hipótese de aceitação

$H_1: \mu > 1 m$ - hipótese alternativa

Foi calculada a probabilidade da Média Populacional Amostral (t) (eq 2) com base nos dados da coluna 2 da Tabela 5, e no valor da Média populacional esperada (μ_0) correspondente a 1,0m para a escala de 1:2.000, que é o valor estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC).

$$t = \frac{(0,306 - 1)}{\frac{0,102}{\sqrt{10}}} \therefore t = -21,46$$

Comparando-se t calculado com o tabelado verifica-se que $t = -21,46 < t_\alpha = 1,383$, aceita-se a hipótese H_0 em nível de significância de 10%, ou seja, a média populacional é menor que 1 m, portanto abaixo

do erro máximo permitido para a Classe A para dados planimétricos na escala cartográfica de 1/2000.

5.1.2 – Análise dos dados altimétricos quanto à acurácia

O método de análise da acurácia na altimetria, de forma semelhante à planimetria, tem início com a definição de um intervalo de confiança de 90% de certeza para uma Média Populacional (μ), obtida através da equação 1 que tem $v = 9$ graus de liberdade. A média populacional foi definida a partir da Média Amostral $X=0,253\text{m}$ e do Desvio Padrão Amostral $\sigma = 0,213\text{m}$, calculados consoante os resultados das discrepâncias das coordenadas planimétricas nos pontos de checagem (coluna 5 da Tabela 4), enquanto o valor de t_α foi retirado da tabela t de Student para um intervalo de confiança de 90%.

Tabela 6 – Resumo dos valores adotados no cálculo da Média Populacional (μ) na análise da acurácia.

Descrição	Valores adotados
Média amostral (X)	0,253 m
Desvio padrão amostral (σ)	0,213 m
Tamanho da amostra (n)	10
Obtido da tabela estatística t-student (t_α)	1,383

Após definição dos parâmetros necessários ao cálculo da Média Populacional (μ), determinou-se seu valor para um intervalo de confiança de 90% e obteve-se $\mu \leq 0,346$, conforme demonstrado a seguir.

$$\mu \leq X + (t_\alpha) \times \left[\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \therefore \mu \leq 0,306 + (1,383) \times \left[\frac{0,213}{\sqrt{10}} \right] \therefore \mu \leq 0,346\text{m}$$

Para a classificação no padrão A, o erro altimétrico máximo permitido, é a metade da

equidistância das curvas-de-nível. Como pelas especificações do DNIT a representação altimétrica deve ser por curvas de nível espaçadas de 1 em 1 metro para uma escala cartográfica de 1:2.000, o PEC será de 0,50m. Esse valor corresponderá à maior média possível para um intervalo de confiança de 90%. Finalmente, para os dados altimétricos utilizados nos testes do presente trabalho, tem-se que a Média Populacional Amostral (μ) é inferior à Maior Média Possível para o intervalo determinado, ou seja, $\mu=0,346\text{ m} \leq 0,50\text{ m}$.

Entretanto, da mesma forma dos testes realizados para os dados planimétricos, para que o teste da altimetria seja conclusivo, deve-se verificar se a probabilidade da Média Populacional Amostral (μ) é menor ou igual a 0,50m. Para isso, foi aplicado o teste de hipótese com nível de significância de 10% e usada a equação 2.

A probabilidade da Média Populacional Amostral (t) foi calculada com base nos dados constantes na coluna 2 da Tabela 6, e no valor da Média populacional esperada (μ_0) correspondente à 0,50m para a escala de 1:2.000, que é o valor do Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC),

$$t = \frac{(X - \mu_0)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \therefore t = \frac{(0,253 - 0,50)}{\frac{0,213}{\sqrt{10}}} \therefore t = -3,66$$

Sendo para o teste de hipótese:

$H_0: \mu \leq 0,50\text{ m}$ - hipótese de aceitação

$H_1: \mu > 0,50\text{ m}$ - hipótese alternativa

Sendo $t = -3,66 < t_\alpha = 1,383$, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%, ou seja, a média populacional é menor que 0,50 m, portanto abaixo do erro máximo permitido para a Classe A na escala cartográfica de 1/2000.

A Tabela 7 é resumo dos valores resultantes dos testes estatísticos para a acurácia da planimetria e altimetria para produto cartográfico na escala 1:2.000.

Tabela 7 – Resultados dos testes estatísticos quanto à acurácia planimétrica e altimétrica.

Valor calculado segundo os dados amostrais	Valores admissíveis	Teste	Classificação para Escala Cartográfica de 1:2.000
Planimetria			
$\mu = 0,351\text{ m}$	1,00 m	$0,351 < 1,00$	A
$t = -21,46$	$t_\alpha = 1,383$	$-21,46 < 1,383$	
Altimetria			
$\mu = 0,346\text{ m}$	0,50 m	$0,346 < 0,50$	A
$t = -3,66$	$t_\alpha = 1,383$	$-3,66 < 1,383$	

5.2 – Análise de precisão

5.2.1 – Análise dos dados planimétricos quanto à precisão

Para avaliar a precisão, foi utilizado um desenvolvimento semelhante ao adotado na determinação da acurácia, diferindo-se, apenas no tipo de teste a ser aplicado, que consiste na estimativa intervalar dada pela distribuição Qui-quadrado (χ^2) em um intervalo de confiança de 90% para a variância populacional σ^2 , obtida através da equação 3 (ZANARDI, 2006; ITAME, 2001). O desvio-padrão da amostra (σ') foi definido a partir do Desvio Padrão Amostral $\sigma = 0,102\text{m}$, calculado a partir das resultantes das discrepâncias das coordenadas planimétricas nos pontos de checagem (coluna 4 da Tabela 4), e do valor de $\chi^2_{1-\alpha}=4,168$ tirado da tabela da distribuição Qui-quadrado (χ^2) para um intervalo de confiança de 90%, para $v=9$ graus de liberdade e $p=0,10$.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(n-1) \times \sigma^2}{\chi^2_{1-\alpha}}} \quad (3)$$

Tabela 8 – Resumo dos valores adotados no cálculo do desvio-padrão da amostra (σ') na análise da precisão.

Descrição	Valores adotados
Tamanho da amostra (n)	10
Desvio padrão amostral (σ)	0,102 m
Obtido da tabela da distribuição Qui-quadrado ($\chi^2_{1-\alpha}$)	4,168
Graus de liberdade ($v=n-1$)	9

Com os dados necessários ao cálculo do desvio-padrão da amostra (σ'), foi determinado o seu valor para um intervalo de confiança de 90%, obtendo-se $\sigma' \leq 0,150$, conforme demonstrado a seguir.

$$\sigma' \leq \sqrt{\frac{(10-1) \times (0,102)^2}{4,168}} \therefore \sigma' \leq 0,150\text{m}$$

Segundo as especificações para a classificação no padrão A, o erro planimétrico permitido de 0,5 mm na escala da carta é de 1,0 m no terreno para a escala 1:2.000. Esse valor corresponde à maior média possível para um intervalo de confiança de 90%. Finalmente, verifica-se que o desvio-padrão da amostra (σ') é inferior ao Maior Desvio Possível para o intervalo determinado, ou seja, $\sigma' = 0,15 \text{ m} \leq 1,0 \text{ m}$.

Entretanto, para que o teste proposto fosse conclusivo, aplicou-se um teste de hipótese através da distribuição Qui-quadrado, por meio da equação 4, em que se confronta a hipótese $H_0: \sigma^2 \leq 1^2$ m com a

hipótese alterantiva $H_1: \sigma^2 > 1^2$. Para o teste, usa-se a equação 4 que calcula o Qui-quadrado (χ^2), em que σ_0^2 é a variância populacional esperada, correspondente a 1,0m para a escala de 1:2.000. O valor $\chi^2_{1-\alpha} = 14,684$ foi retirado da tabela Qui-quadrado (χ^2) para $v=9$ graus de liberdade e $p=0,10$.

$$\chi^2 = \frac{(n-1) \times \sigma^2}{\sigma_0^2} \quad (4)$$

O valor χ^2 calculado para a planimetria é:

$$\chi^2 = \frac{(10-1) \times 0,102^2}{1^2} \therefore \chi^2 = 0,094$$

Sendo,

$H_0: \sigma^2 \leq 1^2$ - hipótese de aceitação

$H_1: \sigma^2 > 1^2$ - hipótese alternativa

Assim $\chi^2 = 0,094 < \chi^2_{\alpha} = 14,684$, aceitando-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%, ou seja, a média populacional é menor que 1 m, portanto abaixo do erro máximo permitido para a Classe A dos dados planimétricos na escala cartográfica de 1:2000.

5.2.2 – Análise dos dados altimétricos quanto à precisão

O método de análise da precisão na altimetria, é idêntico à planimetria.

O desvio-padrão da amostra (σ') foi definido, mediante o Desvio Padrão Amostral $\sigma = 0,213\text{m}$, calculados a partir dos resultantes das discrepâncias das coordenadas planimétricas nos pontos de checagem (coluna 5 da Tabela 4). O valor de $\chi^2_{1-\alpha}=4,168$ foi retirado da tabela da distribuição Qui-quadrado (χ^2) para um intervalo de confiança de 90% dos resultados, para $v=9$ graus de liberdade e $p=0,10$. Com os dados necessários foi determinado o desvio-padrão da amostra (σ'), para um intervalo de confiança de 90%, obtendo-se $\sigma' \leq 0,322$, conforme cálculo a seguir:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(n-1) \times \sigma^2}{\chi^2_{1-\alpha}}} \therefore \sigma' \leq \sqrt{\frac{(10-1) \times (0,213)^2}{4,168}} \therefore \sigma' \leq 0,322$$

Para a classificação no padrão A, conforme demonstrado em item anterior, o padrão de exatidão cartográfica é de 0,50m para a escala cartográfica de 1:2.000, dentre os valores encontrados esse corresponderá à maior média possível para um intervalo de confiança de 90%. Logo, tem-se que o desvio-padrão da amostra (σ') é inferior ao Maior Desvio Possível para o intervalo determinado, ou seja, $\sigma' = 0,322 \text{ m} \leq 0,50 \text{ m}$.

Entretanto, da mesma forma como foi colocado para a análise da precisão planimétrica, para que o teste seja conclusivo, deve-se aplicar um teste de hipótese pela distribuição Qui-quadrado, aplicando-se a equação 4 para o teste pretendido e, posteriormente, um teste de hipótese semelhante ao adotado na planimetria, em que se confronta a hipótese $H_0: \sigma^2 \leq 0,5^2$ m com a hipótese alternativa $H_1: \sigma^2 > 0,5^2$. Para o teste, usa-se a equação 4 que se relaciona com a distribuição Qui-quadrado (χ^2), em que σ_0^2 é a variância populacional esperada que correspondente à 0,50m para a escala de 1:2.000, que é o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC). O valor $\chi^2_{1-\alpha} = 14,684$ retirado da tabela Qui-quadrado (χ^2) para $v=9$ graus de liberdade e $p=0,90$.

$$\chi^2 = \frac{(n-1) \times \sigma^2}{\sigma_0^2} \therefore \chi^2 = \frac{(10-1) \times 0,213^2}{0,5^2} \therefore \chi^2 = 1,728$$

Tabela 9 – Resultados dos testes estatísticos quanto à precisão planimétrica e altimétrica.

Valor calculado segundo os dados amostrais	Valores admissíveis	Teste	Classificação para Escala Cartográfica de 1:2.000 (A, B ou C)
Planimetria			
$\sigma = 0,150$ m	1,00 m	$0,150 < 1,00$	A
$\chi^2 = 0,094$	$\chi^2_{\alpha} = 14,684$	$0,094 < 14,684$	
Altimetria			
$\sigma = 0,322$ m	0,50 m	$0,322 < 0,50$	A
$\chi^2 = 1,728$	$\chi^2_{\alpha} = 14,684$	$1,728 < 14,684$	

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado um sistema de aquisição de imagens digitais com características de baixo custo e destinado à aplicações que necessitem de produtos cartográficos rapidamente, como geralmente são as necessidades de estudos de projetos de rodovias e mapeamentos de pequenas áreas destinadas a outras aplicações na engenharia.

Também foram realizados testes estatísticos de acordo com o Decreto lei 89.817/84 e especificações do DNIT, para as exatidões e precisões planimétricas e altimétricas, de produtos cartográficos gerados com as imagens de câmara digital não-métrica. Os resultados permitiram a classificação dos produtos planimétricos e altimétricos na Classe A, para escala final de 1:2000.

Apesar dos resultados satisfatórios para a escala cartográfica de 1:2.000, os parâmetros ainda estão baseados na cartografia analógica. Ressalta-se a importância de atualização e melhoria das normas para mapeamento com fins de projetos de estradas pelo DNIT, para tirar o máximo proveito da aerofotogrametria digital, como já adotado em outros países.

Sendo,

$H_0: \sigma^2 \leq 0,50^2$ - hipótese de aceitação

$H_1: \sigma^2 > 0,50^2$ - hipótese alternativa

Assim, $\chi^2 = 1,728 < \chi^2_{\alpha} = 14,684$, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%, ou seja, a média populacional é menor que 0,50 m, portanto, abaixo do erro máximo permitido para a Classe A dos dados altimétricos na escala cartográfica de 1/2000.

Finalmente, segue abaixo um quadro resumo dos valores resultantes dos testes estatísticos quanto à precisão da planimetria e altimetria para produto cartográfico na escala 1:2.000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Decreto Nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília [s.n.], 1984.

CORTES, J. B. R. ; MITISHITA, E. A. **Verificação da estabilidade altimétrica em aerotriangulação de fotografias de pequeno formato**. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2008, Recife., 2008. v. I. p. 1-4.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. **Análise da qualidade posicional em bases Cartográficas geradas em CAD**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Curitiba:UFPR. 1998.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes, **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários Escopos Básicos/Instruções de Serviço**, 3a edição, 2006, Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/>>. Acesso: 01 junho 2009.

FHA. **Project Development and Desing Manual**. Washington DC, U.S: Department of Transportation,

Federal Highway Administration. 2008. Disponível em <http://www.wfl.fhwa.dot.gov/design/manual/> acesso: 01 junho 2009.

HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O. **Sistema de Aquisição e Processamento de Dados Georreferenciados para Aplicações em Agricultura de Precisão**. In: COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC Florianópolis. 2004.

ILMB. **Small & Medium Format Digital Camera Specifications 2007**. Canada: Integrated Land Management Bureau (ILMB), Base Mapping and Geomatic Services Branch. Disponível em <http://ilmbwww.gov.bc.ca/crgb/pba/trim/specs/DigCamSpecificationsver2011.pdf>. Acesso: 01 junho 2008.

ITAME, O. Y. **Controle de qualidade aplicado na Modelagem digital de terreno**, Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências Tecnológicas campus Presidente Prudente, São Paulo, 2001.

KARRAS, G. E.; MAVROMATI, D.; MADANI, M., MAVRELIS, G., LYMPEROPOULOU, E.; KAMBOURAKIS, A., GESAFIDIS, S. **Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images**. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 32(5W11):8-11, 1999.

MAIN ROADS WA. **Digital Photogrammetric Mapping**. Technology and Environment Directorate Road and Traffic Engineering Branch Document N. 67/08/44. Government of Western Austrália. 30 p. 2002.

MENESE, L. F.; FIGUEIREDO, E. C. T. P.; LEITE, E. P. F. **Ortorretificação de fotografias aéreas de pequeno formato obtidas com câmara digital convencional**. 2008. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2008, Recife., 2008. v. I. p. 1-8.

NJDOT. **Minimum Guidelines for Aerial Photogrammetric Mapping**. New Jersey: Department of Transportation The State The New Jersey. 1998. Disponível em: <www.state.nj.us/transportation/eng/documents/photogrammetry/Section9.htm>. Acesso: 01 junho 2009.

PIOVESAN, E. C.; SILVEIRA, G. C.; GONÇALVES, J. C. C. **Perspectivas futuras para o projeto SOFIA (Sistema de Obtenção de Fotos e Imagens com Aeromodelo)**. In: COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC Florianópolis. 2004.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; REIS, T. T. **Sistema aerotransportado leve de aquisição de imagens digitais – SAAPL**. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1329-1335.

SCHAEFER, C. E.; REZENDE, S. B. **Fotografias aéreas não-convencionais: uma alternativa de monitoramento ambiental na antártica marítima**. 2004. In: V Simposio Argentino y I Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, 4p.

SILVA, D. C. **Non-Metric Digital Camera Images Versus High Resolution Satellite Images in Regions with High Cloudiness**. In: XXIII International FIG Congress 2006 Proceedings. International Federation of Surveyors, 2006.

SILVA, D. C.; MELO, I. D. F.; Oliveira, R. N. **Alta resolução com uso de câmaras digitais de baixo custo para mapeamento**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. INPE, p. 4561-4568. 2005.

U.S. ARMY. **Photogrammetric Mapping – EM 1110-1-1000 – Engineer Manual (Series Engineering and Design)**. Washington DC, Estados Unidos : U.S. Army Corps of Engineers. 2002.

ZANARDI, R.P. **Geração De Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas**. 2006. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestre.