

Aplicação de Câmaras Digitais na Produção de Ortofotocarta

Daniel R. dos Santos ¹
 Rodrigo A. Dainez ¹
 Zaqueu J. Rodrigues ¹
 Antonio Maria Garcia Tommaselli ²
 Júlio Kyoshi Hasegawa ²
 Maurício Galo ³

¹ Eng^o. Cartógrafo
 Universidade Estadual Paulista - UNESP
 Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
 Rua Roberto Simonsen, 305
 19060-900 Presidente Prudente, S.P.
 ✉ dsantos@prudente.unesp.br

² Prof. Dr. – Depto. Cartografia
 Universidade Estadual Paulista - UNESP
 Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
 Rua Roberto Simonsen, 305
 19060-900 Presidente Prudente, S.P.

³ Ms. – Depto. Cartografia
 Universidade Estadual Paulista - UNESP
 Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
 Rua Roberto Simonsen, 305
 19060-900 Presidente Prudente, S.P.

Conteúdo	1 Introdução 2 Modelos para Geração de Ortofoto 2.1 Método Indireto 2.2 Método Direto 3 Metodologia Utilizada na Geração da Ortofoto 3.1 Etapas da Geração da Ortofoto no Sistema Fotogramétrico Digital 3.1.1 Definição de Parâmetros do Projeto no Socet 3.1.2 Importação das Imagens 3.1.3 Orientação Interior 3.1.4 Fototriangulação 3.1.5 Geração do MDT 3.1.6 Retificação, Mosaicagem e Geração da Ortoimagem Digital 4 Apresentação e Análise dos Resultados 4.1 Apresentação dos Resultados 4.2 Análise dos Resultados 5 Conclusões 6 Referencias Bibliográficas
-----------------	---

Resumo: Uma ortoimagem é uma representação fotográfica do terreno em projeção ortogonal, isto é, foram corrigidas as variações de relevo e da inclinação da aeronave. O resultado é uma fotografia com escala constante, conhecida como ortofoto (ou ortoimagem). A ortofotocarta é uma ortofotografia complementada com toponímia, símbolos e quadriculas, podendo conter informações altimétricas. Para a produção de uma ortofoto são necessários três componentes básicos: uma imagem analógica ou digital; parâmetros de orientação interior e exterior da câmara; e um MDT (Modelo Digital do Terreno) da área. O objetivo deste trabalho é apresentar uma síntese da metodologia empregada para a geração de uma ortofotocarta, produzida a partir de imagens adquiridas por câmaras digitais de baixa resolução, da área teste do Campus da Unesp de Presidente Prudente, tendo sido gerado um modelo digital do terreno, no sistema Socet Set, a partir de um par de fotografias aéreas convencionais digitalizadas.

Palavras chave: Ortofotocarta, MDT, Socet Set, Ortoimagem.

Abstract: An orthoimage is a photographic representation of the terrain in orthogonal projection, that means relief displacement and camera attitude were corrected. The result is an image with constant scale, named orthophoto (or orthoimage). The orthophotomap is an orthophotograph at which toponyms, symbols, graticule, and altimetry were added. For orthophoto production three basic components are required: an analog or digital image; interior and exterior camera orientation parameters; and a DTM (Digital Model Terrain) of the area. The aim of this work is to present a methodology used for production of an orthophotomap, using images acquired with digital cameras, of a test area in UNESP/Presidente Prudente. The digital model was product in Socet Set system using two conventional scanned aerial photographs.

Keywords: Orthophotomap, DTM, Socet Set, Orthoimage.

A Fotogrametria é uma técnica que permite a obtenção de vários produtos cartográficos, tais como mapas topográficos, mosaicos, ortoimagens, etc.

Uma fotografia, analógica ou digital, é uma projeção perspectiva central da cena, que apresenta deslocamento devido ao relevo e à inclinação da aeronave, possuindo, portanto, uma escala não uniforme que varia ponto a ponto.

Assim, faz-se necessário realizar uma retificação diferencial na fotografia, produzindo-se uma ortofoto, ou seja, transforma-se a projeção perspectiva central em uma projeção ortogonal. Para a produção de uma ortofoto são necessários três componentes básicos: uma imagem analógica ou digital; parâmetros de orientação interior e exterior da câmara; e um MDT (Modelo Digital do Terreno) da área.

A ortofoto é uma fotografia ou uma imagem, quando apresentada na forma digital, que representa as feições projetadas ortogonalmente, com uma escala constante, corrigida do deslocamento devido ao relevo e da inclinação da câmara sendo, por isso, geometricamente equivalente a uma carta. Desta forma, podem ser realizadas medidas semelhantes às que são feitas sobre um mapa.

A ortofotocarta é uma ortofotografia (ou ortoimagem) complementada com toponímia, símbolos, quadriculas, com ou sem legenda, podendo conter informações altimétricas.

A ortofoto digital (ou ortoimagem) tem grande importância como mapa e imagem. Como mapa, possui distorção mínima de escala. Como imagem, além de não requerer alguns níveis de detalhes para retratar as feições planimétricas do terreno, possui a mesma qualidade geométrica dos mapas. A geração da ortofoto digital proporciona a diminuição de tempo e esforço do operador, comparado ao processo convencional de restituição.

Com o advento dos sistemas fotogramétricos digitais, bem como o baixo custo dos seus produtos, está ocorrendo a integração de técnicas de mapeamento digital e sistemas de informação geográfica, que tem colaborado muito para o aumento da demanda de ortofotos digitais (BRITO, 1997).

Em função dessas características é de grande utilidade em aplicações tais como: projetos de oleodutos, estradas, irrigação, cadastro urbano, atualização cartográfica, avaliação de imóveis, controle de qualidade, dentre outros.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma síntese da metodologia empregada para a produção de uma ortofotocarta, produzida a partir de imagens adquiridas por câmaras digitais de baixa resolução, sendo o MDT gerado por meio de fotografias convencionais. A área teste foi o Campus da Unesp de Presidente Prudente, sendo a ortofoto gerada por um Sistema Fotogramétrico Digital (Socet Set).

2 Modelos para Geração de Ortofoto

Os modelos fotogramétricos utilizados para geração de uma ortofoto digital são as equações de colinearidade na forma direta e inversa. O modelo de colinearidade na forma inversa realiza a projeção dos pontos no referencial da imagem para o referencial do terreno. Na forma direta realiza a projeção dos pontos do terreno para o referencial da imagem. O modelo de colinearidade na forma direta é dado por (Lugnani, 1987):

$$x = -f \frac{r_{11} * (X - X_0) + r_{12} * (Y - Y_0) + r_{13} * (Z - Z_0)}{r_{31} * (X - X_0) + r_{32} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)}$$

$$y = -f \frac{r_{21} * (X - X_0) + r_{22} * (Y - Y_0) + r_{23} * (Z - Z_0)}{r_{31} * (X - X_0) + r_{32} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)}$$

onde:

r_{ij} : são os elementos da matriz de rotação, função de κ , ϕ , ω ;

x, y : fotocoordenadas;

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do centro perspectivo;

X, Y, Z : coordenadas de Terreno; e

f : distância focal.

2.1 Método Indireto

Como o Socet Set utiliza o método indireto para geração de ortofoto, apenas este método será enfatizado.

O método indireto consiste em projetar os pixels da ortofoto digital para a imagem digital, através da equação (01). Na prática realiza-se a transformação do referencial fotogramétrico para o fiducial (translação do ponto principal) e deste para o digital (Linha, Coluna), através de uma transformação afim. Posteriormente é necessário aplicar algum método de interpolação de tons de cinza (DAL POZ e SANTOS, 1998).

De acordo com DAL POZ e SANTOS (1998), este método, é composto por 3 etapas:

- 1) transformação de pixels para o referencial fotográfico;
- 2) transformação do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital; e
- 3) reamostragem.

2.2 Método Direto

O método direto consiste inicialmente em projetar os pixels da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros sistemáticos e as equações de colinearidade na forma inversa, usualmente de forma iterativa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital. Posteriormente, uma regularização dessa malha é necessária.

Pode-se, então, identificar 3 etapas:

- transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico;
- transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital;
- reamostragem da malha da ortofoto digital.

A primeira etapa deste método refere-se à correção dos erros sistemáticos que afetam a imagem de entrada. Conforme foi descrita, esta correção é feita através de uma transformação afim no plano, seguido de um deslocamento do ponto principal, correções das distorções das lentes e refração fotogramétrica.<

Para a segunda etapa do método é necessário conhecer os parâmetros de orientação exterior (κ , φ , ω , X_0 , Y_0 , Z_0), a distância focal da câmara e um MDT. A terceira etapa consiste na regularização da malha da ortofoto, pois os pontos gerados na etapa anterior não coincidirão com os pixels da ortofoto digital.

3 Metodologia Utilizada na Geração da Ortofoto

Na seqüência é apresentado um fluxograma da metodologia adotada, no qual são mostradas as operações realizadas com as imagens convencionais e com as imagens digitais, lado a lado.

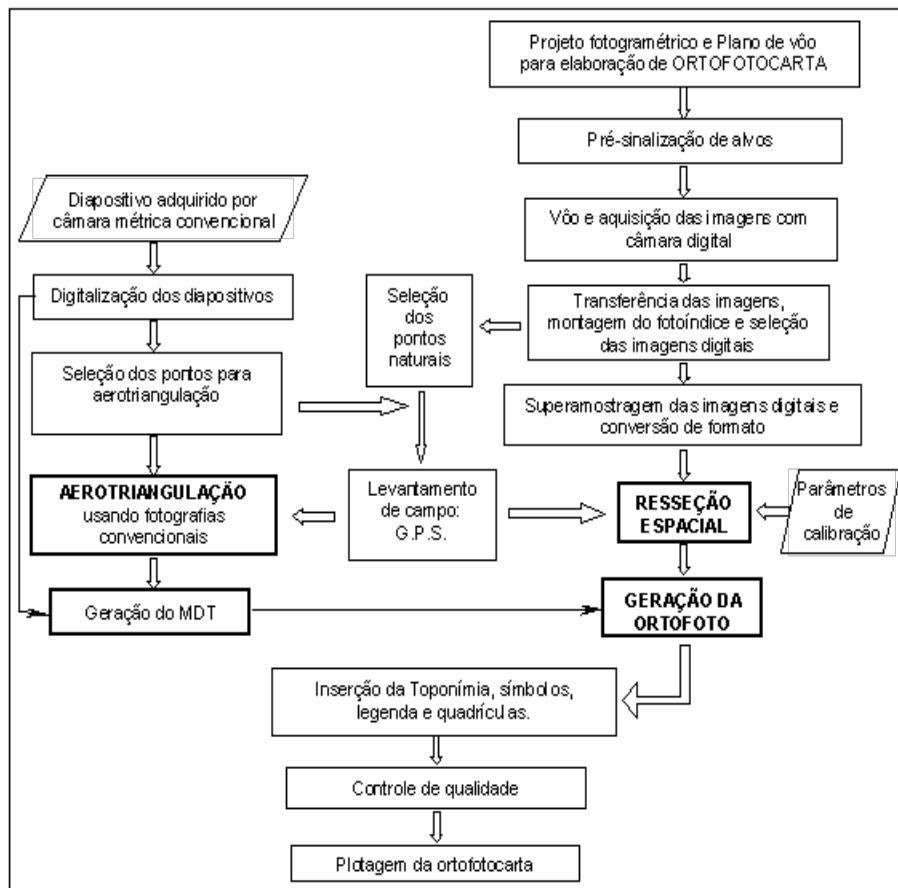


Figura 1: Fluxograma mostrando as principais fases da metodologia adotada no trabalho. As molduras mais espessas correspondem às atividades realizadas no sistema SOCET SET (da LHSystems)

3.1 Etapas da Geração da Ortofoto no Sistema Fotogramétrico Digital

O software SOCET SET é um Sistema Digital Fotogramétrico que visa facilitar as tarefas dos operadores, permitindo a utilização de ferramentas semi-automáticas e automáticas.

3.1.1 Definição de Parâmetros do Projeto no Socet

Para a realização de qualquer projeto no sistema fotogramétrico digital o operador deve definir alguns parâmetros para que sejam atendidas as especificações cartográficas do trabalho, tais como: Datum de referência; formato das coordenadas; unidade das coordenadas; sistema de coordenadas, referência vertical; e elevação mínima e máxima da região. Neste trabalho adotou-se como Datum horizontal o SAD-69, cuja origem topocêntrica encontra-se em Chuá/MG, como Datum vertical o Nível Médio dos Mares

definido pelo marégrafo de Imbituba/SC e como sistema de projeção UTM.

3.1.2 Importação das Imagens

As fotografias convencionais foram digitalizadas em *scanner* fotogramétrico com uma resolução de 28 μ m na escala 1:25.000. As imagens digitais coletadas pela câmara digital estão na escala 1:22.000.

O certificado de calibração da câmara e os parâmetros de orientação exterior aproximados, são dados necessários para a importação das imagens no Socet Set, para se garantir uma orientação adequada.

Os parâmetros de orientação interior, obtidos de um certificado de calibração da câmara fotogramétrica convencional métrica da Wild, foram utilizados para a orientação de duas imagens da cidade de Presidente Prudente na escala 1:25.000, que serviram para a geração do MDT. No caso das imagens digitais, utilizaram-se os parâmetros de orientação interior nominais da câmara digital. Na tabela 1 encontra-se o valor da distância focal das duas câmaras.

Tabela 1 : Distância focal das câmara métrica convencional e da câmara digital

Câmara Métrica Convencional		Câmara Digital	
f (mm)	153.500	f (mm)	58.000

Após a entrada dos parâmetros de orientação interior das duas câmaras realizou-se a importação das duas imagens da cidade e das nove imagens adquiridas pela câmara digital do Câmpus da Unesp de Presidente Prudente.

No processo de importação das imagens pelo Socet Set, é realizada a reamostragem em vários arquivos (pirâmides de imagens), através da mediana dos quatro pixels vizinhos, com um *zoom* mínimo de até 131:1 e máximo de até 4 vezes. Este processo de geração de pirâmides é necessário para aumentar a eficiência do recurso de *zoom* e da correlação automática.

Como as imagens obtidas pela câmara DC210, possuem um tamanho pequeno para serem utilizadas no Socet Set, elas foram superamostradas e convertidas do formato "JPEG" para "TIFF". Esta superamostragem foi necessária para aumentar a resolução da imagem e permitir a realização do processo de minificação (pirâmides imagem) descrito acima. As imagens digitais foram reamostradas quatro vezes, passando do tamanho 1152x864 para 4068x3456.

Para achar o centro fiducial da imagem da câmara digital calcula-se o valor médio considerando-se as dimensões da imagem.

O tamanho do pixel original é de 30 μ m, após a superamostragem, o tamanho do pixel passa a ser de 7,5 μ m.

3.1.3 Orientação Interior

O software Socet Set possui ferramentas automáticas e semi-automáticas para a realização deste procedimento.

Neste trabalho optou-se pela utilização da ferramenta semi-automática, pelo fato de uma das marcas fiduciais da fotografia convencional, não ter condições de identificação e também pelas imagens digitais não possuírem marcas fiduciais definidas, para que o software possa realizar a correlação automática.

Para a realização da orientação interior, o software utiliza os parâmetros de orientação interior inseridos no arquivo de calibração. O software retorna o Erro Médio Quadrático (E.M.Q.), dado na unidade pixel.

3.1.4 Fototriangulação

O aplicativo Socet Set possui ferramentas automáticas e interativas para a realização da fototriangulação do modelo. Optou-se por utilizar duas estratégias diferentes, sendo uma para o modelo formado pelas fotografias adquiridas pela câmara métrica convencional e outra para a digital.

No caso do modelo formado pela câmara convencional, utilizou-se a ferramenta automática para a medida dos pontos de passagem, e para as medidas dos pontos de controle, optou-se pela ferramenta interativa. No caso das imagens digitais utilizou-se a ferramenta interativa para a medida tanto dos pontos de passagem quanto dos pontos de controle (alguns pontos foram medidos em campo e outros medidos no modelo convencional).

Após a medição dos pontos de passagem e de controle, utilizou-se um módulo para visualizar a qualidade das coordenadas do ponto. Primeiramente, verificou-se os erros grosseiros com o auxílio do módulo de detecção de erros grosseiros. Posteriormente, verificou-se os erros em cada coordenada x, y do ponto, linha e coluna, através do módulo de solução simultânea. Esta solução utiliza o Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q.) para ajustar o bloco, fornecendo estatísticas dos erros obtidos, podendo-se determinar os pontos com erros grosseiros.

O procedimento para a fototriangulação das fotografias digitais é similar ao descrito anteriormente. Apenas a orientação relativa automática não foi realizada. Isto porque as imagens digitais, por terem sido superamostradas, não permitem ao software a realização da correlação automática. Assim, foram medidas e fototrianguladas todas as imagens digitais simultaneamente.

3.1.5 Geração do MDT

Após serem fototrianguladas as fotografias convencionais, gerou-se um MDT da área definida, para a produção da ortomagem.

O software possui uma ferramenta para geração automática de MDT, a partir de um estereopar, permitindo que o usuário tenha um arquivo digital do MDT da área de superposição.

O MDT foi gerado no formato de dados *TIN*, no qual são armazenados e gerados triângulos e *breaklines*, que modelam o terreno, com equidistância de 2 m. Algumas feições como árvores e edificações foram filtradas no processo da geração do MDT, através de um módulo de filtragem do próprio aplicativo, porque o algoritmo não consegue distinguir a diferença entre essas feições e o terreno, podendo obter-se uma representação inexata do terreno.

3.1.6 Retificação, Mosaicagem e Geração da Ortoimagem Digital

O software Socet Set, disponibiliza uma ferramenta que realiza a retificação das imagens, posteriormente "mosaica" as imagens retificadas e na seqüência produz a ortorectificação digital. No presente trabalho foram "mosaicadas" nove imagens digitais.

Para o procedimento foi necessário definir linhas de corte para cada imagem, recortando-as de acordo com a área de sobreposição do par de imagens. Definidas essas linhas de corte, foram fornecidos os respectivos dados para a realização da "mosaicagem" e para a geração da ortorectificação digital, tais como: MDT de entrada, GSD (*Ground Sample Distance*), as linhas de corte (definidas num polígono), e a área que será "mosaicada" e ortorectificada.

O método de interpolação utilizado foi a interpolação bilinear, e o espaçamento entre os quadriculados foi de 500 m, pois a escala definida para a ortorectificação foi de 1:5.000. Uma vez determinados todos estes parâmetros, iniciou-se o processo automático de mosaicagem e ortorectificação das imagens digitais.

A partir da carta 1:1.000.000 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), e conhecendo-se as coordenadas geográficas dos limites da ortorectificação digital, obteve-se as coordenadas dos cantos da folha 1:5.000. Esta folha está localizada no fuso 22° S sendo o meridiano central igual a 51° W. Optou-se por fazer uma folha especial, obedecendo às normas de articulação do I.G.C. (Instituto Geográfico do Estado de São Paulo). A partir dos limites da área de trabalho, verificou-se que a ortorectificação digital estava compreendida entre quatro folhas na escala 1:5.000 de acordo com o esquema de articulação relatado. Determinadas as coordenadas geográficas dos limites, utilizou-se o software MGE (*Modular Gis Enviroment*) para fazer o respectivo reticulado. Para a determinação da convergência meridiana, declinação magnética e coeficiente de deformação linear utilizou-se o módulo MGE *Projection Manager*.

4 Apresentação e Análise dos Resultados

4.1 Apresentação dos Resultados

Os resultados obtidos foram um MDT da área e uma ortofotocarta. O MDT da área está representado na figura 2, e a ortofotocarta é representada na figura 3.



Figura 2: Detalhe do MDT obtido para a área teste

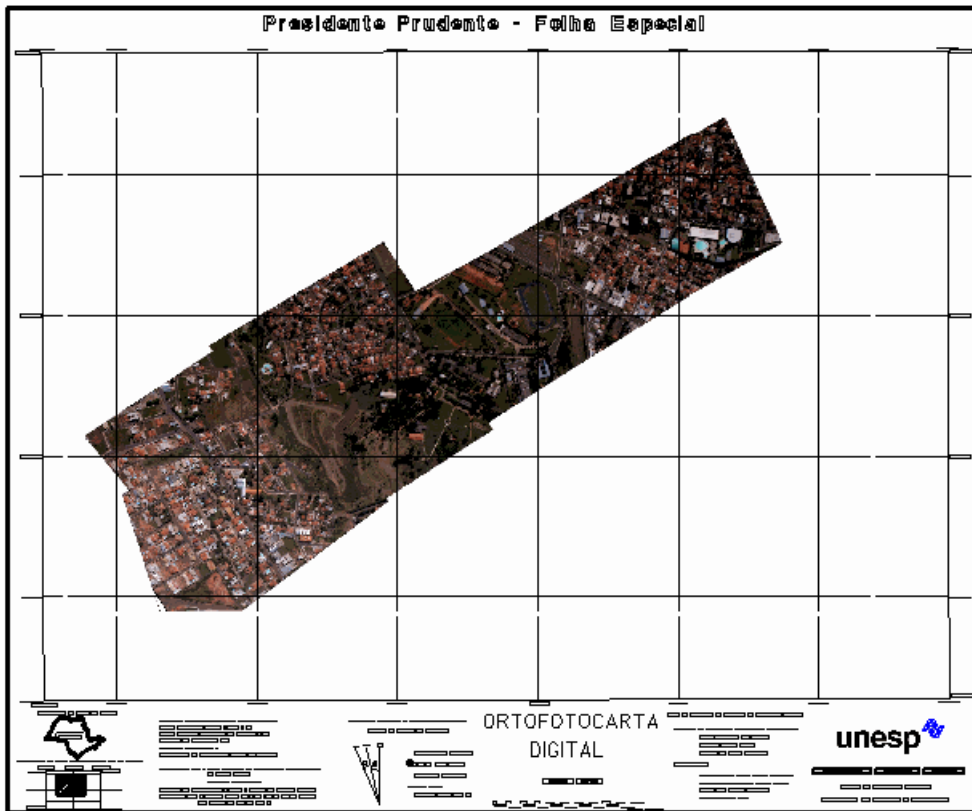


Figura 3: Ortofotocarta da área teste

4.2 Análise dos Resultados

Para a execução do controle de qualidade da ortofotocarta, foram levantados pontos de checagem utilizando a tecnologia GPS (*Global Positioning System*), sendo os mesmos medidos na ortofotocarta e no campo, calculando-se as discrepâncias entre ambos.

Para a análise da exatidão cartográfica da ortofotocarta, relacionada ao PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), utilizou-se o método proposto por Galo e Camargo (1994), baseado na análise estatística das discrepâncias entre os pontos de verificação e as coordenadas dos mesmos pontos, interpolados da ortofotocarta gerada. Para a análise da precisão da ortofotocarta foram tomados 19 pontos de checagem, enquanto que para a análise da precisão do MDT foram utilizados 10 pontos. A tabela 2 mostra a análise de tendência e precisão, realizada para a ortofotocarta.

Tabela 2 : Análise de tendência e da precisão do MDT

Análise de tendência			
Médias amostrais das discrepâncias	Desvios padrão	t amostral	t Student $t_{(n-1, \alpha/2)}$
D_H	S_H (m)	t_H	$t_{(9, 5\%)}$
0,629	0,791	2,508	1,833
Análise da precisão do MDT			
Análise da precisão $c^2_{(n-1, \alpha)}$		c^2 amostral	
Classe	$c^2_{(n-1, 10\%)}$	c^2_H	

A	14,680	12,754
---	--------	--------

Analisando-se a tabela 2, verifica-se que:

- O MDT gerado tem tendência, pois o valor teórico de t encontrado na tabela é menor que o valor calculado, ou seja, $t_H > t_{(9, 5\%)}$;
- A análise de precisão é satisfeita para o MDT considerando a classe A, pois $\chi^2_H < \chi^2_{(9, 5\%)}$.

Tabela 3 - Análise de tendência e da precisão da ortofotocarta

Análise de tendência						
Médias amostrais das discrepâncias		Desvios padrão		t amostral		t Student $t_{(n-1, \alpha / 2)}$
ΔE (m)	ΔN (m)	S_E (m)	S_N (m)	t_E	t_N	$t_{(18, 5\%)}$
-0,96	-0,57	1,88	1,92	1,59	-0,88	1,72
Análise da precisão do MDT						
Análise da precisão $\chi^2_{(n-1, \alpha)}$			χ^2 amostral			
Classe	$\chi^2_{(n-1, 10\%)}$	χ^2_E	χ^2_N			
A	27,20	29,54	28,316			
B	27,20	10,65	10,21			
C	27,20	7,07	7,38			

Analisando-se a tabela 3, pode-se verificar que:

- comparando-se t_E e t_N amostral percebe-se que as componentes E e N da ortofotocarta estão livres de tendência, pois $|t_N| < t_{(18, 10\%)}$;
- a análise não é satisfeita para nenhuma das componentes, considerando a classe A, pois χ^2_E e $\chi^2_N > t_{(18, 10\%)}$; e
- a análise somente é satisfeita para as duas direções, tanto E quanto N, considerando a classe B, pois χ^2_E e $\chi^2_N < t_{(18, 10\%)}$.

5 Conclusões

Verificou-se, com os resultados obtidos, que este produto atende à classe B, de acordo com o decreto lei nº 89.817 - Diário Oficial da União.

Os problemas que causaram a classificação B podem ser considerados:

- Baixo contraste e excesso de ruídos existentes nas fotografias métricas convencionais, utilizadas para gerar o MDT, não possibilitando a identificação exata dos pontos de controle no processo de fototriangulação, influenciando na qualidade do MDT gerado;
- A orientação interior prejudicada, uma vez que as marcas fiduciais não podiam ser identificadas adequadamente, por problemas de iluminação das marcas e baixo contraste;
- Os valores dos parâmetros de orientação interior considerados na orientação interior das imagens digitais foram: distância focal nominal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial igual a zero ($x_0, y_0, k_1 = 0$), ao invés de considerar os resultados de uma calibração.

Pode-se afirmar que, se for eliminado os problemas mencionados, é possível produzir ortofotocartas, usando câmaras digitais, dentro das especificações cartográficas.

Agradecimentos: Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa) pela concessão dos auxílios 97/10745-4 (INFRA III) e 00/00539-7 (bolsa de Mestrado).

6 Referencias Bibliográficas

ALMEIDA J. *Ortofotografia Digital*. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 1989.

ANDRADE J. B. *Fotogrametria*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1998.

ANDRADE J. B.; OLIVAS, A. *Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, no. 26 (1981).

ANESIO D. R. SANTOS, D.; JESUS, R. Z. *Geração de uma ortofotocarta a partir de imagens obtidas com câmaras digitais* In: Trabalho de Graduação, Presidente Prudente, 1999.

BRITO, N. L. *Precision of Digital Orthoimages: Assessment and Application to the Occlusion Detection Problem*, School of the Ohio State University, 1997.

DAL POZ, A.; SANTOS, D. *Geração de ortofoto digital através de uma metodologia híbrida* In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, p. 622-628, Recife, 1999.

GALO, M. *Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais*. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 1993.

GALO, M.; CAMARGO, P.O. *Utilização do GPS na controle de qualidade de cartas*. In: I COBRAC – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis-SC, 1994.

LUGNANI, J. B. *Aprimoramentos para atualização cartográfica*. Curitiba, 1985. 84p. Tese de Professor Titular- Universidade Federal Paraná.

LUGNANI, J. B. *Introdução à fototriangulação*. Curitiba, Universidade Federal Paraná, 134p (1987).

MIKHAIL, E.; ACKERMAN F. *Observations and Least Squares*, University Press of America, 1976.

OLIVEIRA, C. *Dicionário Cartográfico*, Rio de Janeiro, 1980.

MANUAL, Socet Set version 4.1, setembro 1998.