

Utilização de um modelo híbrido para ortoreificação de imagens orbitais: imagem SPOT 5

Wilson Anderson Holler¹
Alzir Felipe Buffara Antunes¹
Daniel Santos¹

¹ Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática
holler@ufpr.br; felipe@ufpr.br; danielsantos@ufpr.br

ABSTRACT

The search for a geometrical quality image is irrefragable in most of the applications in cartography. The orthorectification process has the function to correct the images of the sensor's attitude variation and deformations of the relief, define a constant scale point to point and makes the pro into an orthogonal projection. Several mathematical models have been used for orbital images correction (RPC, APM). The object of this work is a quickly valuation of the fusion of images techniques RGB-HIS, Principal Components and the Transformed Wavelet, aiming at the visual quality of the produced product and the orthorectification of the images with a better visual quality, with the use of the mathematical model of the DLT (Direct Linear Transformation) pure combined with the model of DLT adapted by Habib. The combination resulted in a hybrid model that was implemented in Matlab. The work used two images (SPOT-PAN 5m and SPOT-MS 10m). The areas of study were: the Alexandra district (mountainous area) and the urbane area (flat area) pertaining to the Paranaguá city. The DLT model worked efficiently inside the scales 1:20.000 (mountainous area) and 1:15.000 (flat area). Considering the Standard of Cartographical Exactness (PEC) in the scale 1:15.000 for the flat region and in the scale 1:20.000 for the mountainous region, the orthoimagemaps were classified as classes B and C, respectively.

1. Introdução

Diversos modelos vêm sendo estudados e desenvolvidos para ortoretificação de imagens orbitais. Os modelos mais conhecidos (RPC-*Rational Polynomial Coefficient*, APM- *Affine Projection Model*) nem sempre são os mais confiáveis e acessíveis ao usuário. Torna-se necessário, então, propor outros modelos que permitam ao usuário a ortoretificação, com facilidade computacional e que sejam acessíveis.

Neste trabalho desenvolveu-se uma nova proposta para ortoretificação de imagens utilizando um modelo matemático híbrido, que combina a formulação apresentada por Seedahmed & Habib (2002) para determinar os ângulos de atitude do sensor e a DLT clássica para determinar os parâmetros de translação. Na utilização da DLT inversa para gerar a Ortoimagem faz-se uma combinação dos parâmetros (κ , ϕ , ω), obtidos com o modelo de Seedahmed & Habib (2002), e os determinados pela DLT clássica (X_0 , Y_0 , Z_0) através das relações algébricas apresentadas em Novak (1991, pg. 17).

A implementação do modelo matemático proposto visa avaliar sua potencialidade em duas situações de relevo distintas, isto é, área montanhosa e área plana.

Tendo como objetivo geral deste trabalho ortoretificar uma imagem SPOT, utilizando para isso o modelo matemático híbrido, proposto, avalia-se a qualidade da ortofotocarta gerada através de testes estatísticos classificando-a conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (DECRETO N° 89.817/1984).

O uso do modelo proposto apresenta uma característica inédita para a comunidade e apresenta facilidades na implementação computacional envolvida no processo de ortoretificação de imagens orbitais, abrindo caminho para novas pesquisas envolvendo a formulação matemática tratada neste trabalho.

2. Ortorretificação

As imagens de satélite de alta resolução assim como as fotografias aéreas sofrem o deslocamento da imagem de acordo com a variação do relevo. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para corrigir o deslocamento usando o conhecimento de informações do sensor e modificando as equações de colinearidade, em alguns casos incluindo parâmetros para modelagem de erros e orientação interior ou calibração em órbita Baltsavias *et al.* (2001).

Utilizar modelos rigorosos requer o conhecimento dos dados das efemérides, dos dados de calibração do sensor, sua orientação exterior e interior cuja propriedade pertence às empresas que comercializam as imagens de alta resolução. No entanto, em alguns produtos são disponibilizados os coeficientes polinomiais racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficient*) que através do Modelo Racional Polinomial, implementados em vários programas comerciais, realiza a ortoretificação. Outro modelo é o APM (*Affine Projection Model*). Alguns estudos relatam o desenvolvimento e aplicações deste modelo para ortoretificação Fraser *et al.* (2001) ou para a monorestituição Mitishita e Saraiva (2002).

Torna-se necessário oferecer propostas de mais modelos que permitam ao usuário a ortoretificação, com facilidade computacional e que sejam acessíveis. Isso pode incentivar uma maior utilização de imagens orbitais de alta resolução.

A utilização da transformação DLT, devido ao fato de ser um modelo implícito, tem sido crescente nas aplicações de Sensoriamento Remoto, principalmente quando estes parâmetros não estão disponíveis, como são os casos das imagens Ikonos Geo Fraser (2000) e SPOT5, utilizada neste trabalho.

Seedahmed e Habib (2002) apresentam uma nova formulação da DLT clássica (introduzida por Karara, 1974) e demonstram que os parâmetros físicos reais da matriz de rotação podem ser recuperados explicitamente e sem nenhuma ambigüidade pela

transformação projetiva 2D. A solução desenvolvida serve como uma combinação complementar ao modelo DLT clássico Karara (1974).

Neste trabalho se utiliza a formulação apresentada por Seedahmed E Habib (2002) para determinar os ângulos de atitude do sensor e a DLT clássica para determinar os parâmetros de translação. Na utilização da DLT inversa para gerar a Ortoimagem faz-se uma combinação dos parâmetros obtidos pela formulação de Habib (κ, ϕ, ω) e os determinados pela DLT clássica (X_0, Y_0, Z_0) através das relações algébricas apresentadas em Novak (1991, pg. 17).

Além dos parâmetros citados um Modelo Digital de Terreno (MDT) da região é necessário para a ortoretificação. O MDT modela os pontos pertencentes à superfície física do terreno em questão Santos e Tomaselli (2000). A seguir são descritas as equações envolvidas na Transformação Projetiva e o modelo matemático DLT.

2.1 Transformação Projetiva no Plano

A transformação projetiva no plano é dada pela seguinte equação Lugnani (1987):

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3}{a_7X + a_8Y + 1}; \quad y = \frac{a_4X + a_5Y + a_6}{a_7X + a_8Y + 1} \quad (01)$$

onde:

x e y : coordenadas de um ponto no espaço imagem;

X e Y : coordenadas dos mesmos pontos no espaço objeto;

a_i : parâmetros de transformação.

Como são oito parâmetros a serem determinados, há a necessidade de no mínimo quatro pontos conhecidos no espaço imagem e objeto para encontrar solução única.

É recomendado que o número de pontos conhecidos nos dois espaços seja superior a quatro, e uma vez que erros acidentais são inerentes às observações, o sistema de equações gerado será inconsistente, ou seja, as observações não serão compatíveis com o modelo matemático. Assim, para remover a inconsistência do sistema recorre-se ao ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), que tem por objetivo obter uma solução única para o problema ($V^T PV = \min$) e estimar sua precisão Gemael (1994).

2.2 Direct linear transformation - DLT

Este modelo foi introduzido por Karara e Abdel-Aziz (1974) para permitir a calibração de câmeras não métricas, neste caso possibilita que os parâmetros de orientação interior (OI) e orientação exterior (OE) estejam implícitos na equação, o que é muito útil em se tratando de imagens orbitais.

A equação DLT tem como objetivo realizar uma transformação linear direta das coordenadas no espaço-objeto para as coordenadas no espaço-imagem.

Combinadas a transformação afim geral no plano e a equação de colinearidade pode-se obter a DLT (02), ver mais detalhes em Lee (1996) e Novak (1991).

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}; \quad y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (02)$$

(x, y) = Coordenadas planas no referencial da imagem;

(X, Y, Z) = Coordenadas tridimensionais no referencial geodésico local;

$(L_1, L_2, \dots, L_{11})$ = Parâmetros de transformação.

Os princípios da DLT obedecem aos fundamentos da Geometria Projetiva, portanto suas propriedades matemáticas, a partir do modelo projetivo, podem ser representadas por meios de equações algébricas.

Os parâmetros da DLT (L_1, L_2, \dots, L_{11}) são determinados com o processo de ajustamento por Mínimos Quadrados. O número de equações independentes é maior que o de incógnitas,

portanto há mais de uma solução. Para solução desse problema é realizada uma otimização por mínimos quadrados das soluções possíveis.

Produz-se assim uma matriz de transformação linear projetiva apresentando uma solução aproximada, no sentido da menor distância obtida entre o parâmetro e seu estimador. A forma geral do método paramétrico (03) prediz que os valores observados ajustados podem ser expressos como uma função explícita dos parâmetros ajustados. Para modelos matemáticos lineares (como é a transformação da DLT).

$$L_a = F(X_a) \quad (03)$$

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) = N^{-1} U \quad (04)$$

$$X_a = X \quad (05)$$

$$P_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sigma_x^2 & \\ 0 & 1 \\ & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (06)$$

Onde:

L_a , vetor dos valores observados ajustados;

X_a , vetor dos parâmetros ajustados;

X , vetor das correções aos parâmetros aproximados;

P_i , no presente estudo é uma submatriz da matriz (diagonal) dos pesos das observações no espaço imagem.

A vantagem desse método é que o modelo usado para transformação linear, ou seja, num processo de ajustamento não há a necessidade de iterações. A desvantagem é que seus parâmetros não possuem significado físico. A solução obtida (L , x_p , y_p , c_x , c_y , φ , κ , ω , X_0 , Y_0 , Z_0) é sensível a configuração dos pontos no espaço objeto Novak (1991).

3. Material e Método

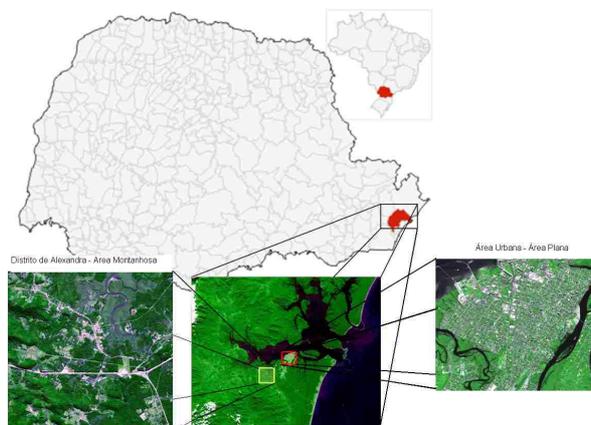
3.1 Materiais

- Programas: ERDAS 8.7, ENVI 4.2, MatLab 6.5 e ArcView 9.1.
- Imagem HRG-SPOT5 da região – nível 1B de correção geométrica, cedida pela Universidade de Paris I;
- Receptores *Trimble 4000SSi* (dupla frequência) e *Promark 2* (uma frequência);
- Programa: *Ashtech Solutions 2.7*.

3.2 Área de estudo

Foram escolhidas duas áreas de estudo para avaliação do modelo uma área montanhosa e uma área plana. A imagem SPOT 5 abrange a área do Município de Paranaguá no Paraná, datada de maio de 2004, com nível 1B de correção geométrica. Na **figura 1** a área com textura amarela (distrito de Alexandra) situa-se próxima a Escarpa da Serra do Mar e corresponde a uma região com diferença de nível de até 250m em altitude. A área com textura vermelha corresponde à zona urbana da cidade e possui uma altitude média de 10m.

FIGURA 1 – ÁREAS DE ESTUDO: MUNICÍPIO DE PARANAGUÁ-PR

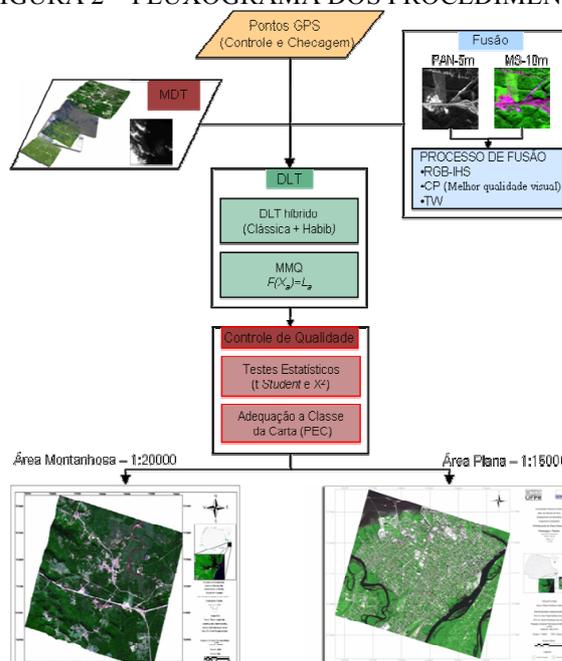


3.3 Método proposto

A **figura 2** apresenta o fluxograma dos processos envolvidos no trabalho, primeiramente foi realizada a fusão das imagem SPOT 5 PAN-5m e MS-10m, Coleta dos pontos de controle e checagem, obtenção do MDT e posteriormente utiliza-se um modelo matemático híbrido para ortorretificação. Para avaliar o modelo matemático proposto utilizou-se de testes estatísticos (t e X^2).

Foram testados três algoritmos (RGB-IHS, Componentes Principais e Transformada Wavelet) para fusão de imagens. O algoritmo de fusão adotado foi das Componentes Principais por apresentar melhor qualidade de visualização para identificação de pontos de controle.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS



Os pontos de controle foram escolhidos entre as feições com melhor identificação na imagem, constituindo de intersecções entre estradas (esquinas), pontes e passarelas.

Para tomada dos pontos no terreno utilizou-se o método de posicionamento NAVSTAR-GPS relativo utilizando a técnica estático-rápido. O tempo de ocupação foi de 5 minutos com uma taxa de coleta de dados de 5 segundos, obtendo assim 75 épocas garantindo uma precisão

mínima, que foi adotada neste trabalho como sendo menor que 2,5m, metade da resolução espacial da imagem (5m).

Utilizou-se as curvas de nível retiradas do mapa topográfico na escala 1:25.000 com curvas de nível equidistantes de 10m para criar o Modelo Digital de Terreno (MDT). O modelo foi criado por meio de um TIN (*Triangulate Irregular Network*) e posteriormente convertido para o padrão *Raster* obtendo uma imagem no formato imagem TIFF para as áreas de interesse.

Para determinar os parâmetros de orientação exterior ($\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$) se utiliza a formulação apresentada por Seedahmed e Habib (2002) para os ângulos de atitude (κ, φ, ω) do sensor e os de translação (X_0, Y_0, Z_0) são determinados pela DLT clássica.

Na utilização da DLT inversa para gerar a Ortoimagem faz-se uma combinação dos parâmetros obtidos pela formulação de Habib (κ, φ, ω) e os determinados pela DLT clássica (X_0, Y_0, Z_0) através das relações algébricas apresentadas em NOVAK (1991).

A equação projetiva na notação matemática colocada anteriormente (seção 2.1) se apresenta de forma não linear. Segundo Seedahmed e Habib (2002), pode-se reescrevê-la linearmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x &= Xa_1 + Ya_2 + a_3 - (x - e_x)Xa_7 - (x - e_x)Ya_8 - e_x \\ y &= Xa_4 + Ya_5 + a_6 - (y - e_y)Xa_7 - (y - e_y)Ya_8 - e_y \end{aligned} \quad (07)$$

Onde:

e_x e e_y : são os erros desconhecidos verdadeiros associados com as coordenadas imagem medidas;

x, y : são as coordenadas imagem;

X, Y : são as coordenadas do espaço objeto;

$a_1...a_8$: são os parâmetros da transformação projetiva.

Os erros (e_x, e_y) são negligenciados neste trabalho.

Para a determinação dos parâmetros da DLT clássica (seção 2.2) pode-se reescrevê-la linearmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x &= XL_1 + YL_2 + ZL_3 + L_4 - xXL_9 - xYL_{10} - xZL_{11} \\ y &= XL_4 + YL_5 + ZL_6 + L_8 - yXL_9 - yYL_{10} - yZL_{11} \end{aligned} \quad (18)$$

Segundo GEMAEL (1994), quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático $F(X_o) = L_o$, dizemos que o ajustamento se processa pelo Método Paramétrico. Para avaliar o ajustamento das observações foi analisada a matriz variância covariância (MVC) das observações obtendo resultados (desvio-padrão) abaixo do erro permitido sendo, estes, da ordem de 2,5m.

A análise da exatidão cartográfica da ortofotocarta, relacionada ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), baseou-se na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas de referência (obtidas a partir do levantamento de campo por meio da tecnologia NAVSTAR-GPS) e as coordenadas obtidas na ortofotocarta.

Para avaliar a qualidade da ortofoto gerada realizaram-se dois testes estatísticos, sendo eles:

- *t Student* – para análise de tendência das componentes E, N e h;
- X^2 (Qui-Quadrado) – para análise da precisão das ortofotocartas geradas.

A utilização dos testes estatísticos citados baseia-se nas proposições apresentadas por Galo e Camargo (1994) e Dalmolin e Leal (2001).

O **quadro 1** mostra a média e os desvios padrão obtidos e utilizados para a análise de tendência. Esta análise serve para verificar se os dados são tendenciosos ou não. Para isso

aplica-se o teste estatístico *t Student*. O intervalo de confiança das amostras é dado pelo módulo do valor obtido $t_{(E,N,h)}$ para cada componente.

QUADRO 1 – ANÁLISE DE TENDÊNCIA

	Área Montanhosa			Área Plana		
	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
Média	-1,70	-2,02	4,40	-0,12	-0,34	-0,76
Desvio Padrão	10,99	6,03	4,77	3,78	6,03	3,85
$t_{(E,N,h)}$ (Amostral)	-0,35	-0,75	2,06	-0,07	-0,13	-0,44
$t_{(5,5\%)}$ (Student)	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13

Com a análise do **quadro 1**, verifica-se que, ao comparar t_E , t_N e t_h amostral, todas as componentes da ortofotocarta estão livres de tendência, pois t_E , t_N e $t_h < t_{(5,5\%)}$.

O **quadro 2** mostra o PEC, Erro Permitido (EP) e o desvio padrão associado para as escalas 1:15000 e 1:20000.

QUADRO 2 – PRECISÃO PLANIMÉTRICA – PEC

Classe	Escala 1:15.000			Escala 1:20.000		
	PEC(m)	EP(m)	σ (m)	PEC(m)	EP(m)	σ (m)
A	7,5	4,5	3,18	10	6	4,24
B	12	7,5	5,30	16	10	7,07
C	15	9	6,36	20	12	8,49

O **quadro 3** mostra a precisão altimétrica segundo o PEC. A precisão altimétrica é dada segundo a equidistância das curvas de nível e não em relação à escala. Porém a relação entre escala e equidistância é direta visto que, por exemplo, em uma escala 1:10.0000 a equidistância de 10m entre as curvas de nível é impossível de ser representada com fidelidade.

QUADRO 3 – PRECISÃO ALTIMÉTRICA – PEC

Classe	PEC(m)	EP(m)	Desvio (m)
A	5,00	3,33	2,36
B	6,00	4,00	2,83
C	7,50	5,00	3,54

O **quadro 4** apresenta os valores obtidos para a precisão da ortofotocarta considerando as escalas 1:15000 e 1:20000.

QUADRO 4 – PRECISÃO DA ORTOFOTOCARTA

$\chi^2_{(n-1,\alpha)}$		Área Montanhosa						Área Plana					
		1:15.000			1:20.000			1:15.000			1:20.000		
		$X^2_{Amostral}$			$X^2_{Amostral}$			$X^2_{Amostral}$			$X^2_{Amostral}$		
Classe	$X^2_{(4,10\%)}$	X^2_E	X^2_N	X^2_h									
A	9,24	47,67	14,38	9,01	26,82	8,09	5,07	5,66	14,37	5,85	8,08	8,08	3,29
B	9,24	17,16	5,17	3,24	9,65	2,91	1,82	2,04	5,17	2,11	1,14	2,91	1,18
C	9,24	11,92	3,59	2,25	6,7	2,02	1,27	1,41	3,59	1,46	0,79	2,02	0,82

Percebe-se que para a área Montanhosa somente na escala 1:20.000 os valores χ^2 encontram-se no intervalo de confiança. Para a área Plana o intervalo de confiança encontra-se na escala 1:15.000.

Ao considerar a classe A para a área Montanhosa, na escala 1:20.000, e analisar os **quadros 2, 3 e 4** verifica-se que a precisão para a área Montanhosa não é satisfeita apenas

para a componente E. A análise é satisfeita para as três componentes (E, N, h) ao considerar a classe C, pois χ_E^2 , χ_N^2 e $\chi_h^2 < \chi^2_{(n-1,\alpha)}$.

Para a área Plana ao considerar a classe A, na escala 1:15.000, e analisar os **quadros 2, 3 e 4** verifica-se que a precisão não é satisfeita apenas para a componente N. A análise é satisfeita para as três componentes (E, N, h) ao considerar a classe B, pois χ_E^2 , χ_N^2 e $\chi_h^2 < \chi^2_{(n-1,\alpha)}$.

Pode-se dizer que as análises são satisfeitas para o MDT das regiões. Esta afirmação não é conclusiva visto que para a área Plana o MDT foi gerado com apenas uma curva de nível com altitude de 10m, obtendo assim um MDT com altitude média de 10m e relevo plano.

5. Conclusões e recomendações

Após análise dos resultados obtidos com as técnicas de fusão de imagens e os procedimentos para ortoretificação de imagens proposto têm-se a seguir as conclusões.

A metodologia de implementação de um modelo matemático híbrido, em MatLab, para fins de ortoretificação de imagens, com facilidade de implementação computacional mostrou-se eficaz para as imagens e regiões de estudo.

A utilização do modelo DLT adaptado por Seedahmed e Habib (2002) somado ao modelo matemático DLT clássica, foi satisfatória dentro da escala de dados disponíveis.

A avaliação das ortofotocartas resultantes foi satisfatória considerando o PEC para a escala 1:15.000 para a região plana e na escala 1:20.000 para a região montanhosa, as quais foram classificadas como classe B e C, respectivamente.

Recomenda-se comparar o método proposto com outros métodos como APM e RPC para verificar a sua eficácia assim como utilizar outros sensores de alta resolução.

6- Refências Bibliográficas

Baltsavias, E. Pateraki, M. Zhang, L. **Radiometric and Geometric Evaluation of Ikonos Geo Images and Their Use For 3D Guilding Modelling**. ISPRS joint Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001", Hanover, Germany, 19-21 September 2001.

Dalmolin, Q. leal E. M. **Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 7, nº1, p.21-40, 2001.

Fraser, C. S. High-Resolution Satellite Imagery: **A Review of Metric Aspects**. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7. Amsterdam, 2000. CD-ROM.

Fraser, C. S.; Hanley H. B.; Yamakawa, T. **Sub-Metre Geopositioning With Ikonos Geo Imagery**. ISPRS joint Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001", Hanover, Germany, 19-21 September 2001.

Galo, Mauricio; Camargo, Paulo de O. **Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas**. In: I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis - SC. 1994.

Gemael, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações, Aplicações Geodésicas**. Curitiba, Editora UFPR, 1994.

Karara, H. M.; Abdel Aziz, Y. I. **Accuracy Spects of Non-metric Imageries**. Photogrammetric Engineering, v.40, n.9, pp.1107-1117. 1974.

Lee, C. K. **Dynamic Monitoring With Video Systems**. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, B.B. Canada, 1996.

Lugnani, J. B. (1987). **Introdução à Fototriangulação**. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba - PR. 134p.

Mitishita, Edson A.; Saraiva, C. Claudia. **Modelos Matemáticos para Fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução Ikonos 2 - GEO**. Simpósio Brasileiro de Geomática – Anais do Simpósio, CD-Rom, UESP – Presidente Prudente, 9 –13 de julho de 2002.

Novac, K. **Analytical Photogrammetry**. Department of Geodetic Science and Surveying. Ohio State University. Columbus, OH. 1991.

Santos, Daniel R dos; TOMMASELLI, Antonio M G; GALO, Mauricio; HASEGAWA, Júlio K; DAINEZ, Rodrigo A; RODRIGES, Zaquel de Jesus. **Aplicação de Câmaras Digitais na Produção de Ortofotocarta**. In: COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis - SC. 2000.

Seedahmed, Gamal H.; Habib, Ayman F. **LINEAR RECOVERY OF THE EXTERIOR ORIENTATION PARAMETERS IN A PLANAR OBJECT SPACE**. Dept. of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science. 2002.

DECRETO Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>>. Acesso em: 05 de junho de 2006.