

O uso de polinômios racionais na ortorretificação de imagens de satélite

Antonio José Ferreira Machado e Silva

Gisplan Tecnologia da Geoinformação - GISPLAN
Av. Armando Lombardi 800 s311 – 22640-020 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos - SP, Brasil
antonio@gisplan.com.br

Abstract. This paper presents the results of the use of rational polynomial coefficients (RPC's) in the orthorectification process of Ikonos data. It describes the mathematic model to obtain the RPC's, the methodology used to evaluate the RPC's and shows the results obtained for different scenarios, varying the incidence angle and the terrain topography.

Palavras-chave: Ikonos, high resolution, geometric evaluation, ortho image, alta resolução, avaliação geométrica, orto-imagem.

1. Introdução

O uso de polinômios racionais nos processos de ortorretificação de imagens de satélite está diretamente relacionado ao advento das imagens de alta resolução espacial.

Estas imagens, diferentemente das imagens nadir de sensores de média resolução espacial, sofrem forte degradação devido ao relevo. Geralmente, as imagens de alta resolução são obtidas em visada oblíqua, o que agrava ainda mais a distorção causada pela topografia do terreno.

Assim sendo, para obter imagens com alta qualidade geométrica, com precisão interna melhor que duas vezes a resolução espacial, é necessário que estas imagens passem por um processo de ortorretificação, que consiste na redução das distorções causadas pelo relevo.

A melhor e mais eficiente maneira de se ortorretificar uma imagem de satélite é incluir um Modelo Numérico de Elevação do Terreno (MNET) no processo de correção geométrica.

Os operadores dos satélites oferecem esta possibilidade, mas o custo do processo é muito elevado, dificultando a aquisição deste tipo de produto. Além disso, a qualidade final da imagem depende sobre-maneira da qualidade do MNET e dos pontos de controle, que na grande maioria dos casos, devem ser fornecidos pelo cliente (comprador da imagem). Isso causa um problema de responsabilidade, pois na visão do operador, possíveis problemas na imagem seriam decorrentes da qualidade do MNET e dos pontos de controle, enquanto na visão do cliente ocorreriam por conta do processo de ortorretificação.

Em função disso, os operadores passaram a oferecer parâmetros que permitem a ortorretificação pelo próprio cliente. Ao invés de abrir o modelo de geometria do sensor e fornecer os parâmetros orbitais (efemérides e atitude), os operadores fornecem coeficientes de polinômios racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficients*). Diversos *softwares* comerciais dispõem de funcionalidade que permite a ortorretificação a partir do trinômio imagem-MNET-RPC. No caso das imagens Ikonos, o produto geometricamente corrigido acrescido dos coeficientes polinomiais racionais é conhecido como Geo Ortho Kit.

Estes polinômios relacionam um ponto da imagem ortorretificada (nível 4), por meio de suas coordenadas geodésicas (latitude - ϕ , longitude - λ e altitude - H), com um ponto da imagem não ortorretificada (mas geometricamente corrigida – nível 2), por meio de suas coordenadas de imagem (linha - L e coluna - C). Foi escolhido o polinômio de terceiro grau (P^3), de \mathcal{R}^3 em \mathcal{R}^2 , totalizando 59 (cinquenta e nove) coeficientes (DIAL, 2000):

$$(L, C)_{N2} = P^3(\phi, \lambda, H)_{N4} \quad (1.a)$$

$$L = \frac{a_0 + a_1 \cdot \phi + a_2 \cdot \lambda + a_3 \cdot H + \dots + a_{17} \cdot \phi^3 + a_{18} \cdot \lambda^3 + a_{19} \cdot H^3}{1 + c_1 \cdot \phi + c_2 \cdot \lambda + c_3 \cdot H + \dots + c_{17} \cdot \phi^3 + c_{18} \cdot \lambda^3 + c_{19} \cdot H^3} \quad (1.b)$$

$$C = \frac{b_0 + b_1 \cdot \phi + b_2 \cdot \lambda + b_3 \cdot H + \dots + b_{17} \cdot \phi^3 + b_{18} \cdot \lambda^3 + b_{19} \cdot H^3}{1 + c_1 \cdot \phi + c_2 \cdot \lambda + c_3 \cdot H + \dots + c_{17} \cdot \phi^3 + c_{18} \cdot \lambda^3 + c_{19} \cdot H^3} \quad (1.c)$$

Ainda existe um desconhecimento muito grande sobre o que são e como são obtidos esses coeficientes. Além disso, não há um estudo sobre a qualidade destes coeficientes e da validade em utilizá-los em processos de ortorretificação. Eles são válidos em qualquer situação de terreno e sobre qualquer geometria de visada da imagem?

Visando esclarecer estas dúvidas, este trabalho apresenta os resultados da avaliação do emprego de coeficientes polinomiais racionais (RPC) no processo de ortorretificação de imagens do satélite Ikonos.

Os fatores que mais influenciam a qualidade dos RPC's são: resolução espacial do sensor, amplitude da área geográfica de atuação dos RPC's, variação de altitude desta área e inclinação da visada central da imagem, ou ângulo de elevação do satélite, no caso das imagens Ikonos. É importante destacar que o cálculo dos coeficientes polinomiais racionais (RPC) não contempla nenhum conhecimento da topografia da cena, a menos das altitudes mínima (H_{\min}), média (H_{med}) e máxima (H_{\max}).

2. Ortorretificação por RPC's

O processo de ortorretificação por polinômios racionais envolve duas fases distintas. A primeira consiste na definição do grau do polinômio e da determinação dos coeficientes deste polinômio. A segunda encerra o uso destes coeficientes para executar a ortorretificação (PASSINI and JACOBSEN, 2004).

Na primeira fase, conforme apresentado nas **Equações 1.a, 1.b e 1.c**, deve-se calcular os 59 coeficientes do polinômio racional de terceiro grau. Na segunda fase, o processo de mapeamento inverso é facilmente executado a partir dos RPC's e de um MNET.

2.1 Modelo para cálculo dos RPC's

O modelo de correção geométrica (\mathfrak{S}) relaciona um *pixel* $(L, C)_{N0}$ da imagem bruta (nível 0) com um ponto da superfície representativa da Terra (ϕ, λ, H) . No caso em que se desconhece a topografia do terreno, utiliza-se um elipsóide de revolução como modelo de representação da Terra. Atualmente, é relativamente fácil conhecer de forma aproximada a altitude média da imagem, e esta altitude pode e deve ser utilizada para refinar o modelo de representação da Terra.

O processo que relaciona um ponto da imagem bruta com um ponto da superfície da Terra é conhecido como mapeamento direto e ocorre em dois passos. No primeiro, utiliza-se um elipsóide auxiliar, baseado num elipsóide padrão, de um *datum* selecionado pelo usuário (ex.: SAD-69, WGS-84 ou SIRGAS) e na altitude média da cena. Neste momento obtém-se coordenadas retangulares espaciais (X, Y, Z) .

No segundo passo, as coordenadas espaciais são convertidas para coordenadas geodésicas, tendo como base o mesmo elipsóide padrão utilizado no passo anterior, e a altitude encontrada é praticamente idêntica à altitude média. As **Equações 2.a, 2.b e 2.c** sintetizam o processo de mapeamento direto.

$$\mathfrak{S}(L, C)_{N0} = (\phi, \lambda, H_{\text{med}}) \quad (2.a)$$

$$\mathfrak{T}_1(L, C)_{N0} = (X, Y, Z) \quad (2.b)$$

$$\mathfrak{T}_2(X, Y, Z) = (\phi, \lambda, H_{med}) \quad (2.c)$$

Em função da projeção cartográfica (\wp) escolhida pelo usuário, as coordenadas geodésicas são transformadas em coordenadas planas de projeção (E,N), e estas em coordenadas de imagem corrigida (L,C)_{N2}. Este processo representa a geração de imagens nível 2, dentro da definição de produtos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Se a imagem corrigida estiver orientada à órbita, a última transformação (\mathfrak{S}) é a de similaridade (translação, rotação e escala), onde os fatores de translação são as coordenadas do canto superior da imagem, a rotação é dada pela inclinação da órbita e o fator de escala definido pelo tamanho do *pixel*. Se a imagem estiver orientada ao Norte, não há necessidade de rotação.

$$\wp(\phi, \lambda) = (E, N) \quad (3)$$

$$\mathfrak{S}(E, N) = (L, C)_{N2} \quad (4)$$

Posteriormente, processo é refeito, relacionando-se o mesmo *pixel* (L, C)_{N0} da imagem bruta com diversos pontos de diferentes superfícies representativas da Terra, cada uma representada por um elipsóide de revolução ajustado a diferentes altitudes (H_k), que variam da altitude mínima (H_{min}) à máxima (H_{max}). Também aqui o processo é dividido em duas etapas, onde na primeira é utilizado um elipsóide auxiliar, baseado na altitude H_k e na segunda é utilizado o elipsóide padrão.

$$\mathfrak{T}_k(L, C)_{N0} = (\phi_k, \lambda_k, H_k) \quad (5.a)$$

$$\mathfrak{T}_{k,1}(L, C)_{N0} = (X, Y, Z) \quad (5.b)$$

$$\mathfrak{T}_{k,2}(X, Y, Z) = (\phi_k, \lambda_k, H_k) \quad (5.c)$$

A partir da relação entre um conjunto de pares de coordenadas de imagem corrigida (L,C)_{i,j} e diferentes ternos de coordenadas de imagem ortorretificada (ϕ_k, λ_k, H_k)_{i,j}, calcula-se os coeficientes polinomiais racionais (RPC – a_n, b_n e c_n).

$$(a_n, b_n, c_n) = \Psi((L, C)_{i,j}, (\phi_k, \lambda_k, H_k)_{i,j}) \quad (6)$$

A determinação dos coeficientes depende da taxa de amostra dos pontos (i,j) e dos extratos de altitude (k). O modelo é linear e os coeficientes podem ser calculados pelo método dos mínimos quadrados (GEMAEL, 1994). A **Figura 1** sintetiza este processo.

2.2 Modelo de ortorretificação

O modelo de ortorretificação por polinômios racionais representa o mapeamento inverso no processo de correção geométrica de imagens de satélite. Ele relaciona cada ponto da imagem ortorretificada (nível 4) com um ponto da imagem geometricamente corrigida (nível 2), por meio dos RPC's.

Os coeficientes polinomiais são determinados para o mesmo *datum* utilizado na geração do produto de nível 2. No caso de imagens Ikonos, geralmente este *datum* é o WGS-84. Mas existe a possibilidade do usuário gerar uma imagem ortorretificada num *datum* diferente ao do produto original.

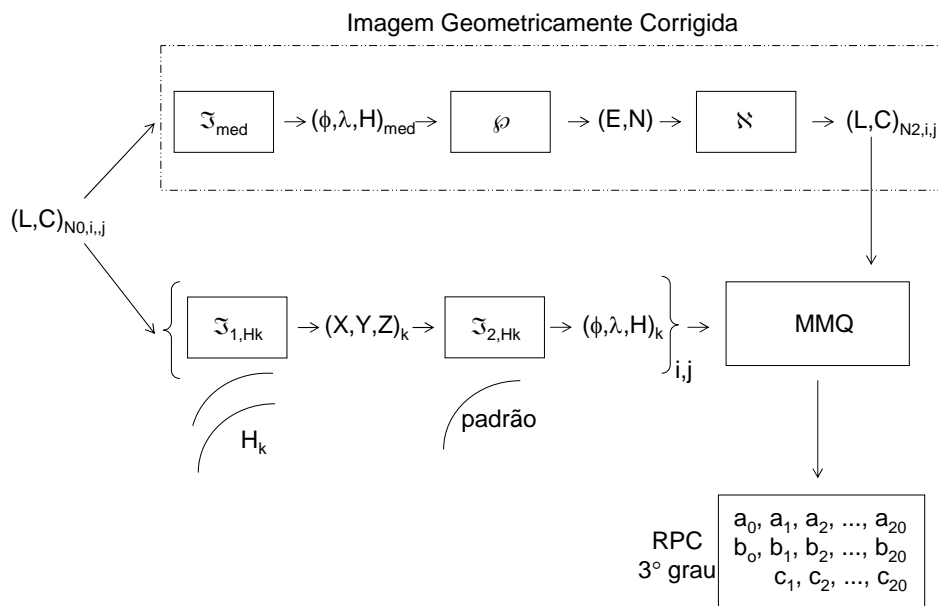


Figura 1 – Processo de obtenção dos coeficientes polinomiais racionais.

Uma vez definido o espaço imagem do produto ortorretificado, é possível estabelecer uma relação entre as coordenadas de imagem ortorretificada $(L, C)_{N4}$ e as de projeção cartográfica (E, N) , de forma idêntica à apresentada na **Equação 4**. Em seguida, transforma-se as coordenadas planas de projeção em coordenadas geodésicas (**Equação 3**). Essas coordenadas são a chave para acesso ao MNET, de forma a se obter a altitude do *pixel*. Caso o *datum* da imagem ortorretificada seja diferente do *datum* do MNET, uma transformação adicional (Φ) será requerida.

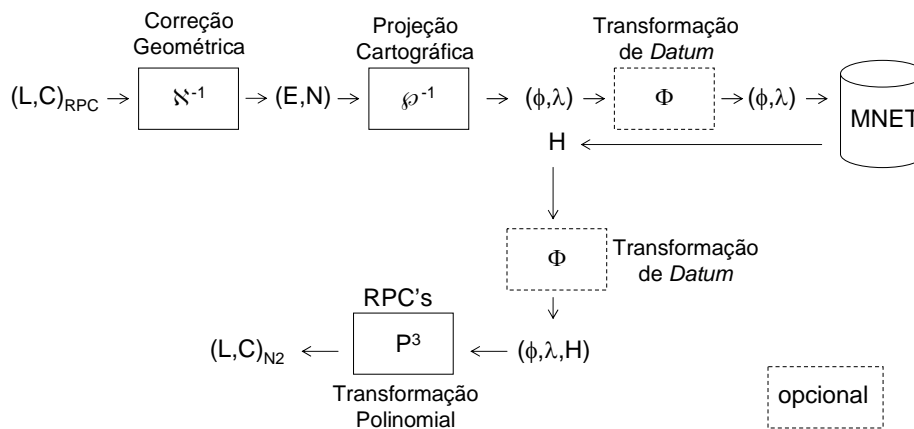
$$\Phi(\phi, \lambda, H)_{datum-i} = (\phi, \lambda, H)_{datum-j} \quad (7)$$

De posse das coordenadas geodésicas, da altitude e dos coeficientes, chega-se ao *pixel* da imagem nível 2, de onde se extrairá o nível de cinza. Novamente pode ocorrer uma necessidade de conversão de *datum*, caso haja discrepância entre estes nos níveis 2 e 4 (ortorretificado). A **Figura 2** sintetiza o processo de ortorretificação.

3. Metodologia e resultados

O estudo se concentrou nas imagens de alta resolução espacial (1m) do satélite Ikonos. As áreas geográficas analisadas apresentaram um tamanho padrão de $11 \times 11 \text{ km}^2$. Como a altitude mínima não tem influência sobre a qualidade dos coeficientes, mas sim a diferença entre as altitudes máxima e mínima, apenas a variação desta diferença foi observada. Assim sendo, foram analisados dezesseis cenários, onde as diferenças entre altitude máxima e mínima foram de 300m, 600m, 900 e 1.200m e as inclinações em relação ao nadir foram de 10° , 20° , 30° e 40° . Isto equivale, grosso modo, a ângulos de elevação de 80° , 70° , 60° e 50° , respectivamente.

O satélite Ikonos tem total liberdade para girar em qualquer direção, sem limites angulares. Entretanto, aos usuários são oferecidas imagens com inclinação em relação ao nadir que não ultrapassa 40° .



$$NC[(L,C)_{RPC}] = NC[(L,C)_{N2}]$$

Figura 2 – Modelo de ortorretificação por RPC.

Para cada cenário foi gerada uma cena segundo dois diferentes modelos de ortorretificação. O primeiro é o modelo rígido, onde o processo de correção geométrica da imagem inclui o MNET e o segundo, que se pretende avaliar neste trabalho, utiliza polinômios racionais de terceiro grau. O modelo rígido é utilizado para geração de imagens nível 4 de processamento nas estações terrenas do INPE (COSTA et al., 2006), pelo sistema MS³ (*Multi Satellite Station System*).

Não houve uma avaliação absoluta, comparando os resultados com o terreno, pela extrema dificuldade de se conseguir dados Ikonos relativos aos dezesseis cenários citados anteriormente. O objetivo foi comparar os dois modelos de ortorretificação para avaliar a validade do uso de polinômios racionais para ortorretificar imagens de satélite de alta resolução espacial.

3.1 Simulação dos cenários

Para o processamento das imagens Ikonos, utilizou-se um modelo para a câmera similar aos modelos de câmeras do tipo CCD, com os dados disponíveis, quais sejam, distância focal, número de detectores por varredura e resolução espacial. Os dados orbitais foram obtidos junto ao sítio www.celestrak.com.

Por mais que o modelo não reproduza fielmente a realidade, ele é suficientemente preciso para permitir o estudo comparativo entre os modelos de ortorretificação.

Em relação ao modelo do terreno, trabalhou-se com a área da Folha Mairiporã (SF-23-Y-C-III-4-NE), na escala de 1:25.000, no Estado de São Paulo, para a qual a Gisplan dispõe de um MNET com precisão de 2m. Esta folha abrange a seguinte área geográfica: latitude: S23:15:00 a S23:22:30 e longitude W46:30:00 a W46:37:30).

A Gisplan realizou a restituição plani-altimétrica dessa região, utilizando pares estereoscópicos de imagens Ikonos (MACHADO E SILVA et al., 2004).

3.2 Resultados

A **Tabela 1** apresenta os resultados relativos à comparação direta entre as coordenadas de um mesmo *pixel* obtidas pelos dois modelos. Para cada ponto de controle foram comparadas as coordenadas, e computados os erros, tal como apresentado nas **Equações 8 a 11**.

$$erro_i = \sqrt{(E_{N4,i} - E_{RPC,i})^2 + (N_{N4,i} - N_{RPC,i})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i erro_i^2}{NPC - 1}} \quad (9)$$

$$erro_{\min} = \min\{erro_i\} \quad (10)$$

$$erro_{\max} = \max\{erro_i\} \quad (11)$$

Tabela 1 – Erro do processo de ortorretificação por polinômios racionais.

		$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 40^\circ$
H = 300m	RMSE	0,37	2,71	12,07	14,07
	mínimo	0,00	0,05	0,01	0,07
	máximo	1,11	6,97	33,78	40,65
H = 600m	RMSE	1,91	5,70	27,29	49,75
	mínimo	0,01	0,01	0,09	0,13
	máximo	4,87	18,46	93,92	102,56
H = 900m	RMSE	0,41	2,40	6,65	11,67
	mínimo	0,00	0,02	0,00	0,02
	máximo	1,36	6,54	12,10	38,15
H = 1.200m	RMSE	0,62	0,32	4,27	6,90
	mínimo	0,00	0,01	0,02	0,03
	máximo	1,87	0,99	11,52	20,01

Os resultados demonstram claramente a viabilidade de emprego dos coeficientes polinomiais racionais para imagens com baixo ângulo de inclinação em relação ao nadir (até 20°), ou alto ângulo de elevação do satélite (superior a 70°). No caso do satélite Ikonos, o usuário tem a opção de receber imagens com ângulo de elevação superior a 72° (GEOEYE, 2006), o que permite a ortorretificação, mesmo no caso de terrenos com desnível de até 1.200m.

Os resultados da **Tabela 1**, para inclinação em relação ao nadir de até 20° , com exceção do cenário de desnível de altitude de 600m, mostram a possibilidade da ortorretificação por polinômios racionais atingir a escala de 1:10.000, quando considerada apenas a exatidão planimétrica. Esse resultado é bastante auspicioso, pois, em função da opção descrita no parágrafo anterior e da topografia do território brasileiro, a maioria das imagens Ikonos se encaixa nestas situações.

Para inclinações maiores (ou ângulos de elevação menores), os resultados apontam para uma qualidade geométrica incompatível com a escala de 1:10.000. Nestes casos, o modelo rígido de correção geométrica, que integra o MNET durante o processo de correção geométrica, é o mais indicado.

4. Considerações finais

Os resultados demonstram a limitação do uso de polinômios racionais, para ortorretificação de imagens Ikonos, aos casos em que a inclinação em relação ao nadir não ultrapasse 20° . Mas

isso não caracteriza um grande problema, pois a grande maioria das imagens deste sensor atende a esta especificação.

A idéia do emprego destes coeficientes é simples, mas traz resultados muito interessantes, pois permite ao próprio usuário ortorretificar suas imagens. Pode-se afirmar que apesar de simples, foi uma inovação nos processos de transformação geométrica de imagens de satélite.

Deve-se destacar que este trabalho não analisou a influência da precisão do MNET na qualidade geométrica da imagem ortorretificada. O próximo passo será dado no sentido de verificar a viabilidade do emprego do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) como o modelo de elevação do terreno a ser utilizado na ortorretificação de imagens de alta resolução espacial.

A partir de 2007, o INPE vai disponibilizar os RPC's para as imagens CCD e HRC do CBERS-2B. Antes da distribuição, haverá um estudo semelhante para a realidade destes dois sensores. Prevê-se que os resultados sejam melhores ainda para os sensores deste novo satélite.

O CCD-CBERS pode ser obtido com inclinação de até 32°, mas a resolução espacial é de 20m. Os resultados da **Tabela 1** para 30° são ruins para um sensor de 1m de resolução espacial, mas excelente para um sensor de 20m.

O HRC-CBERS tem um limite mais estreito de inclinação, não ultrapassando 5°. Isso, combinado com a resolução espacial de 2,5m, indicam que os RPC's terão grande serventia em se tratando dos sensores do CBERS-2B.

A idéia da utilização de polinômios racionais em transformações geométricas pode ser estendida a outros campos. Os polinômios não racionais não se mostraram muito eficientes para registrar imagens de satélite, seja no caso de registro imagem-carta, imagem-imagem do mesmo sensor, ou imagem-imagem entre sensores diferentes. Bons resultados só eram alcançados quando polinômios de primeiro grau eram suficientes.

Os polinômios racionais permitem o registro de imagens mesmo quando as distorções forem de ordem superior. Infelizmente, os atuais *softwares* comerciais não apresentam funcionalidades que permitam utilizar este tipo de polinômio em transformações geométricas, mas essa é uma necessidade que terá que ser atendida no futuro próximo.

Referências

Costa, E. R.; Silva, M. A. O.; Neves, P E.; Machado e Silva, A. J. F. Ortorretificação: um passo a mais no processamento de imagens CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2006, Florianópolis. No prelo.

Dial, G. **RPC Data File Format**. Bolder, CO, USA: Space Imaging, 2000. 5 p. (QA-REF-054).

Gemael, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba: UFPR, 1994. 320 p.

GeoEye. **Ikonos Imagery Product Guide**. Dulles, VA, USA: GeoEye, 2006. 21 p.

Machado e Silva, A. J. F.; Silva, M. V. D., Santini, D. Mapeamento Topográfico Usando Imagens Ikonos. **Infogeo**, v. 27, p. 21-22, 2004.

Passini, R.; Jacobsen, K. Accuracy Analysis of Digital Orthophotoss from High Resolution Imagery. In: International Symposium on Photogrammetric and Remote Sensing, ISPRS Comission IV, Workgroup 7, 2004, Istanbul. CD-ROM, On-line. Disponível em <<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/437.pdf>>. Acesso em 13 de outubro de 2006.