

ORIENTAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE IMAGENS CBERS USANDO RODOVIAS COMO CONTROLE DE CAMPO

Semiautomatic CBERS image orientation using roads as ground control

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ¹

JÚLIO CESAR SCALCO²

¹Departamento de Cartografia – FCT/UNESP

²Mestrando em Ciências Cartográficas - FCT/UNESP

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 - Presidente Prudente, SP

aluir@fct.unesp.br; jiscalco@pos.prudente.unesp.br

RESUMO

Neste artigo é proposta uma metodologia para a orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. Baseia-se numa estratégia iterativa envolvendo três etapas. Na primeira etapa um operador identifica na imagem as rodovias de controle de campo e fornece alguns pontos sementes, distribuídos grosseira e esparsamente ao longo ou nas imediações das rodovias. Estes pontos sementes são utilizados pelo algoritmo de otimização de programação dinâmica para extrair as rodovias na imagem. Na segunda etapa são estabelecidas correspondências pontuais entre as rodovias de controle e as correspondentes rodovias extraídas na imagem. Na terceira etapa as correspondências pontuais são utilizadas para orientar a imagem usando a DLT (Direct Linear Transformation). As duas últimas etapas do processo são iteradas até que se verifique a estabilização do processo de orientação. Os resultados experimentais possibilitaram verificar que a metodologia proposta foi eficiente com várias imagens teste. Em todos os casos se verificou a convergência do processo de orientação. Além disso, os parâmetros estimados de orientação possibilitaram o registro de rodovias de verificação com acurácia no nível do pixel ou melhor.

Palavras Chaves: Imagem CBERS; Controle de Campo; DLT; Extração de Rodovias; Orientação de Imagens.

ABSTRACT

In this paper is proposed a methodology for semiautomatic CBERS image orientation using roads as ground control. It is based on an iterative strategy

involving three steps. In the first step, an operator identifies on the image the ground control roads and supplies along them a few seed points, which could be sparsely and coarsely distributed. These seed points are used by the dynamic programming algorithm for extracting the ground control roads from the image. In the second step, it is established the correspondences between points describing the ground control roads and the corresponding ones extracted from the image. In the last step, the corresponding points are used to orient the CBERS image by using the DLT (Direct Linear Transformation). The two last steps are iterated until the convergence of the orientation process is verified. Experimental results showed that the proposed methodology was efficient with several test images. In all cases the orientation process converged. Moreover, the estimated orientation parameters allowed the registration of check roads with pixel accuracy or better.

Keywords: CBERS Image; Ground Control; DLT; Road Extraction; Image Orientation.

1. INTRODUÇÃO

A orientação de imagem é um problema básico em Fotogrametria, sendo indispensável para o georreferenciamento da própria imagem ou de feições cartográficas coletadas sobre a mesma. O processo de orientação pode ser dividido em três tipos básicos: 1) *Direto* – nesse caso, os parâmetros de orientação são obtidos diretamente usando, por exemplo, o GPS (*Global Positioning System*) e um INS (*Inertial Navigation System*), que permitem, respectivamente, a medida da posição e da atitude no instante de tomada da imagem; 2) *Indireto* – nesse caso, um modelo matemático, como o de colinearidade, e informações de apoio de campo medidas nos espaços-imagem e -objeto, são utilizados para estimar, geralmente pelo MMQ (*Método dos Mínimos Quadrados*), os parâmetros de orientação exterior; e 3) *Híbrido* – esse é o caso quando nem todos os parâmetros de orientação exterior são medidos diretamente (por exemplo, só a posição de tomada medida pelo GPS) ou quando todos são medidos com precisão insuficiente, havendo a necessidade de refiná-los, a posteriori, com algumas informações de controle de campo, com uso do segundo tipo de metodologia.

A modelagem da geometria de imagem é necessária para estabelecer as relações entre feições dos espaços imagem e objeto. Vários modelos matemáticos foram propostos para esta finalidade, sendo que o mais popular é a equação de colinearidade, que é bastante utilizada na Fotogrametria (MIKHAIL et al., 2001). Em se tratando de imagens adquiridas por sensores de varredura eletrônica (*pushbroom*), como as imagens SPOT e CBERS, vários modelos matemáticos com diferente complexidade, rigor e precisão foram propostos (FRITSCH et al.; 2000, HATTORI et al., 2000; DOWMAN et al., 2003; POLI, 2004). Os modelos matemáticos existentes podem ser classificados em modelos aproximados e rigorosos. Os modelos rigorosos levam em conta o processo físico de formação da

imagem, valendo-se então da geometria interna e externa do sensor, podendo-se basear tanto em feições pontuais e como lineares (HABIB et al., 2004). Nesses casos os parâmetros físicos da geometria interna (por exemplo, a distância focal) e externa (posição e atitude em função do tempo) do sensor são incluídos explicitamente nos modelos matemáticos. Os modelos aproximados não modelam explicitamente a geometria interna e externa do sensor. Em outras palavras, os parâmetros envolvidos geralmente não possuem significado físico ou geométrico. Os modelos matemáticos vão desde uma simples transformação afim (OKAMOTO et al., 1998) ou função polinomial (OKAMOTO et al., 1999) até os mais elaborados envolvendo as funções racionais (TAO et al., 2000) e a DLT (KARARA, 1989 e EL-MANADILI e NOVAK, 1996). A grande vantagem desses modelos é a simplicidade, tanto matemática como algorítmica, não havendo a necessidade de entendimento da geometria de imageamento. Por outro lado, os modelos rigorosos propiciam maior acurácia e uma análise estatística mais confiável dos resultados do processo de orientação.

Neste trabalho é proposta uma metodologia indireta de orientação semi-automática de imagens CBERS usando a DLT e feições rodoviárias como controle de campo. A principal motivação para o desenvolvimento desta metodologia está diretamente ligada à dificuldade de se identificar pontos de apoio em imagens de baixa-resolução, a exemplo de imagens CBERS. Ao contrário, a identificação e a extração de rodovias nestas imagens são relativamente fáceis. Embora a metodologia proposta dependa de pontos de apoio para a orientação da imagem via DLT, todos estes pontos são gerados internamente no processo de orientação através de uma estratégia numérica de estabelecimento de correspondência entre pontos das rodovias de controle e das correspondentes extraídas na imagem. Centenas de pontos de apoio podem ser gerados com pouca intervenção de um operador. Este trabalho está organizado em 4 seções. A metodologia proposta é apresentada na Seção 2. Os resultados obtidos e as principais conclusões são apresentados nas Seções 3 e 4, respectivamente.

2. METODOLOGIA DE ORIENTAÇÃO

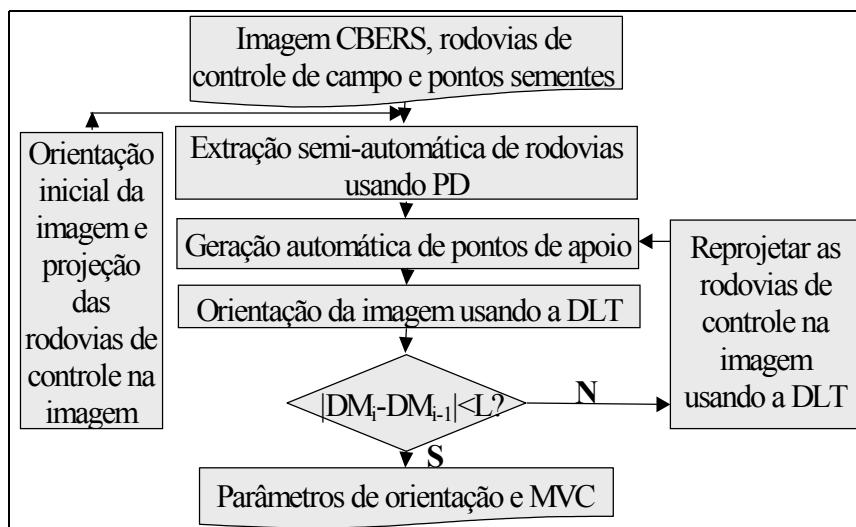
A metodologia proposta para orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo é apresentada na figura 1. Os dados de entrada são a própria imagem, as rodovias de controle de campo e os pontos sementes necessários para a extração semi-automática das rodovias usando programação dinâmica (PD). O método trabalha com quatro passos básicos, além de um laço de realimentação que controla a convergência do processo.

A orientação inicial ou aproximada da imagem e a extração automática de rodovias usando PD são realizadas primeiramente. A orientação inicial da imagem é realizada com um modelo matemático simples, como por exemplo uma transformação afim bidimensional. Como uma orientação inicial grosseira é

suficiente, os pontos comuns no espaço-imagem e no espaço-objeto podem ser selecionados de forma também grosseira. Para a orientação usando a transformação afim, são necessários pelo menos três pontos de apoio selecionados próximo ou sobre detalhes notáveis das rodovias, como em cruzamentos de rodovias. A orientação inicial da imagem permite a projeção das rodovias de controle de campo sobre a imagem, facilitando ao operador identificar as rodovias homólogas que serão utilizadas no processo de orientação. O operador fornece, sobre ou próximo às rodovias selecionadas na imagem, alguns pontos sementes esparsa e grosseiramente distribuídos, necessários para inicializar a extração semi-automática das rodovias selecionadas via PD.

Os dois passos seguintes são totalmente automáticos e são controlados por um laço de realimentação. A geração automática de pontos de controle consiste no estabelecimento de correspondência entre pontos das rodovias de controle e das correspondentes extraídas na imagem. A orientação da imagem usando a DLT utiliza os pontos gerados no passo anterior. Sejam DM_i e $DM_{i,i}$ as distâncias médias entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas, em duas iterações sucessivas, respectivamente. O processo de orientação converge quando $|DM_i - DM_{i,i}| < L$, sendo L um limiar preestabelecido. Caso a convergência não seja verificada, os parâmetros estimados da DLT são utilizados para reprojetar as rodovias de controle de campo sobre a imagem, e assim por diante. À medida que as iterações vão sendo realizadas, os parâmetros de orientação da DLT vão sendo refinados e, consequentemente, as rodovias de controle de campo reprojetadas tornam-se cada vez mais similares e próximas das correspondentes rodovias extraídas, possibilitando então a geração de pontos de apoio com qualidade crescente. Quando não é mais possível melhorar esse processo iterativo, o que é objetivamente verificado pelo teste de convergência acima descrito ($|DM_i - DM_{i,i}| < L$), finaliza-se o laço de realimentação.

Figura 1 – Metodologia de orientação



Como mostra a figura 1, os resultados do processo de orientação são os parâmetros de orientação da DLT e a matriz de variância-covariância (MVC) desses parâmetros. Na seqüência desta seção são apresentados mais detalhes sobre os passos de extração de rodovias usando PD, de geração automática de pontos de apoio e de orientação da imagem usando a DLT. Entretanto, por ser o diferencial deste artigo, grande ênfase será dado ao processo de geração automática de pontos de apoio.

2.1 Extração de Rodovias

A extração de rodovias através do algoritmo de PD consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia de otimização global. Para inicializar o processo de extração é necessário que o operador forneça alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia, dando origem a uma linha poligonal inicial, a ser refinada através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração, novos vértices aproximados são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes. A linha poligonal resultante é então refinada resolvendo o modelo geral de rodovia através do algoritmo de PD. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal descrevendo a rodovia.

O modelo genérico de rodovia pode ser formulado levando em conta propriedades fotométricas e geométricas do objeto rodovia. Considerando que uma

rodovia pode ser representada por uma linha poligonal $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (x_i, y_i)$ é o i-ésimo vértice, o seguinte par de equações pode ser usado para modelar a entidade rodovia (DAL POZ et al., 2000),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta \cdot Ep_2 + \gamma \cdot Ep_3)[1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})]) / \Delta S_i = \sum_{i=1}^{n-1} E_i, (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (2)$$

onde:

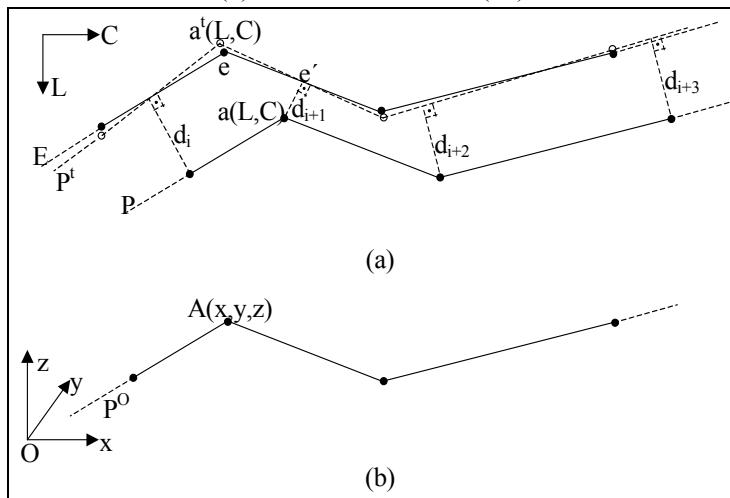
- E : corresponde à função merito (eq. 1), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia;
- C_i : devido a sua definição (eq. 2), também é denominada de injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$;
- T é um limiar predefinido;
- Ep_1, Ep_2 e Ep_3 : parâmetros representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i da linha poligonal;
- ΔS_i : distância entre os vértices $i-1$ e i da linha poligonal; e
- β e γ : são constantes positivas.

Como mostra a equação 1, nem todos os vértices estão inter-relacionados simultaneamente. Nesse caso, o algoritmo de PD pode ser utilizado para resolver eficientemente o problema de otimização (BALLARD; BROWN, 1982). Mais detalhes do processo de extração de rodovias sumariado acima são encontrados em DAL POZ (2000).

2.2 Geração automática de pontos de apoio

A figura 2 mostra o princípio do método para a geração automática de pontos de apoio considerando apenas um par de rodovias homólogas, isto é, P^O e E . A rodovia de controle P^O é determinada através de algum método de levantamento de campo ou é obtida de uma base de dados preexistente. A feição P^O é descrita por uma lista de pontos no referencial tridimensional Oxyz do espaço-objeto (figura 1(b)). A correspondente rodovia no espaço-imagem (E) (figura 1(a)) é descrita por uma lista de pontos no referencial LC da imagem, podendo ser extraída eficientemente pelo algoritmo de PD.

Figura 2 – Geração automática de pontos de apoio. (a) Rodovias no espaço-imagem.
 (b) Rodovia de controle (P^0)



O problema de geração de pontos de apoio, dadas as rodovias homólogas E e P^0 , consiste em determinar os vértices de P^0 em E . Em outras palavras, tem-se um problema de determinação de correspondência pontual entre duas feições lineares em espaços de dimensões diferentes, valendo destacar que não existe correspondência entre os vértices das feições envolvidas (P^0 e E). Na solução proposta esse problema é resolvido indiretamente através da redução do problema original num outro, no espaço bidimensional da imagem. Esta redução é realizada através da projeção da rodovia de controle P^0 na imagem, resultando na rodovia projetada P (figura 2(a)). Bastaria agora determinar as correspondências pontuais entre P e E utilizando o critério de distância mínima, consistindo em projetar ortogonalmente cada vértice de P em E (MAIA, 2003). Entretanto, como mostra o exemplo da figura 2(a), este critério é inefficiente quando ambas as feições envolvidas possuírem diferenças sistemáticas. No exemplo ilustrativo da figura 2(a), a diferença sistemática facilmente notada é uma translação. Nestas condições, a determinação de pontos homólogos pelo critério de distância mínima produziria resultados com grandes erros sistemáticos. Por exemplo, o ponto $A(x, y, z) \in P^0$, cuja projeção na imagem se dá em $a(L, C) \in P$, tem seu ponto homólogo em $e' \in E$. Notar na figura 2(a) que e' é a projeção ortogonal de $a(L, C)$ em E . Notar que existe um grande erro sistemático na determinação de e' . Esse erro seria evitado se existisse um modelo matemático que, aplicado à feição P , produziria uma outra feição P^t (figura 2(a)) com diferenças apenas randômicas em relação à rodovia extraída E . Após a aplicação de um modelo matemático com esta característica, o critério de distância mínima poderia ser aplicado para determinar eficientemente o ponto

correspondente de $A(x,y,z)$ em E , resultando num ponto bem próximo de $e \in E$. Este ponto seria obtido através da projeção ortogonal do ponto $a^t(L,C) \in P^t$ em E . Pares de pontos obtidos dessa forma seriam correspondências válidas para resolver o problema de orientação de imagem.

O critério de distância mínima para determinação de correspondência entre duas feições lineares é bastante simples, podendo ser encontrado, por exemplo, em MAIA (2003) e MAIA e DAL POZ (2004). A melhoria desse processo de correspondência mediante a modelagem prévia das diferenças sistemáticas é, como já foi destacado, o diferencial desse artigo e, como tal, será apresentada em detalhes abaixo.

Na figura 2(a), d_i é a distância entre um vértice qualquer de P e sua projeção ortogonal sobre E . Sendo n o número de vértices em P , a distância média (D) entre P e E é dada por:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3)$$

O problema a ser resolvido consiste em aplicar uma transformação geométrica adequada em P , tal que D seja mínima. Após a aplicação da transformação geométrica à feição P , o resultado seria uma linha poligonal transformada (P'), identificada pela linha tracejada na Figura 2(a). Por hipótese, a linha poligonal P' possuiria apenas diferenças randômicas em relação à linha poligonal E . Sendo,

$$P = \{p_1, \dots, p_n\} \quad (4)$$

a seqüência de vértices que define a linha poligonal P e,

$$p_i^t = T(u_1, \dots, u_k, p_i) \quad (5)$$

uma transformação geométrica com k parâmetros u_i , então a seqüência P pode ser transformada em P' na forma que segue:

$$P^t = \{T(u_1, \dots, u_k, p_1), \dots, T(u_1, \dots, u_k, p_n)\} = \{p_1^t, \dots, p_n^t\} \quad (6)$$

Assim, como os pontos p_i^t dependem dos parâmetros u_1, \dots, u_k , a equação da distância média (D) pode ser reescrita na forma:

$$D(u_1, \dots, u_k) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i(u_1, \dots, u_k)}{n} \quad (7)$$

Sendo $U = [u_1 \dots u_k]^T$ o vetor dos parâmetros incógnitos e sabendo-se que cada componente varia num intervalo conhecido, pode-se expressá-lo na forma:

$$U = U_0 + I^T \delta U \quad (8)$$

onde,

- $U_0 = [u_1^0 \ u_2^0 \ \dots \ u_k^0]^T$ é o limite inferior de variação do vetor U ;
- $\delta U = [\delta u_1 \dots \delta u_k]^T$ é a resolução dos componentes do vetor U ;
- $I = [i_1 \dots i_k]^T = \left[\int \left(\frac{u_1 - u_1^0}{\delta u_1} \right) \dots \int \left(\frac{u_k - u_k^0}{\delta u_k} \right) \right]^T$.

Como U depende apenas de I , já que U_0 e δU são parâmetros previamente fixados, a equação 7 pode ser reescrita na forma:

$$D(i_1, \dots, i_k) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i(i_1, \dots, i_k)}{n} \quad (9)$$

A equação 9 mostra que a métrica D passa a depender de variáveis que assumem valores no N^k . Assim, cada variável i_i , $i = 1, \dots, k$, assume valor no intervalo $[0; i_i^t]$, onde $i_i^t = \int \left(\frac{u_i^t - u_i^0}{\delta u_i} \right)$, sendo u_i^t o limite superior para a variável real u_i .

A solução I da equação 9 é tal que:

$$D(i_1, \dots, i_k) \rightarrow \text{mínimo} \quad (10)$$

Uma solução equivalente pode ser obtida diretamente da equação 7, impondo a condição:

$$D(u_1, \dots, u_k) \rightarrow \text{mínimo} \quad (11)$$

A solução da expressão 10 é um vetor é um vetor k -dimensional de números naturais, isto é, $I = [i_1 \dots i_k]^T$. Já a solução da expressão 11 é também um vetor k -

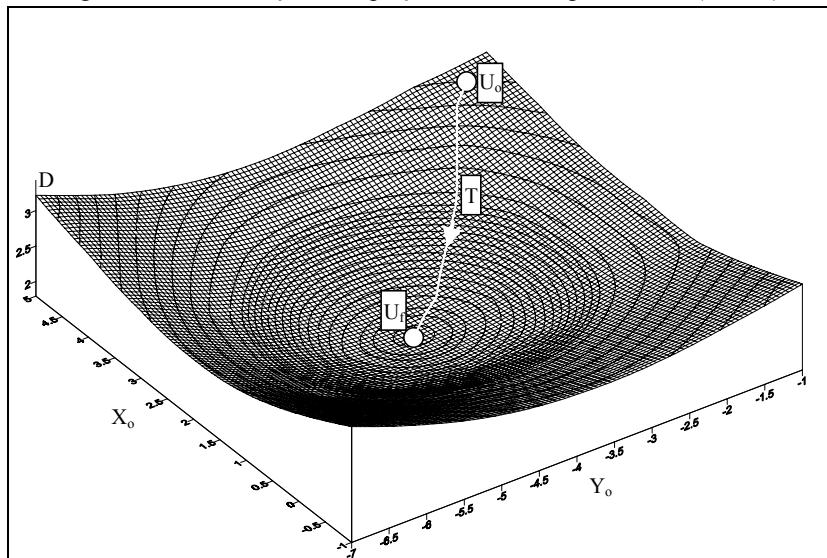
dimensional, só que agora de números reais, expresso na forma $U = [u_1 \dots u_k]^T$. A solução I da expressão 10 é transformada na solução U da expressão 11 através da equação 8. A expressão 10 ou 11 pode ser estendida para vários pares de rodovias homólogas. Neste caso, a métrica D equivaleria à distância média entre todos os pares do tipo (E, Pⁱ) presentes na imagem. Isso garantiria a robustez para a solução, mesmo quando somente rodovias retas, não paralelas, estivessem disponíveis.

A solução da expressão 10 ou 11 envolve um problema combinatorial, cuja solução, embora possa ser teoricamente encontrada pela combinação exaustiva dos valores possíveis das variáveis contidas em I ou U, exige um esforço computacional proibitivo quando o valor de k for relativamente grande.

Para se ter uma idéia da complexidade do espaço de solução, supor agora um caso em que as rodovias projetadas numa imagem CBERS de 20 m possuem um erro de registro de 50 pixels (1 km no terreno) e um erro de orientação de 3°. Só com estas informações, a sobreposição ótima entre as rodovias projetadas e extraídas seria garantida deslocando-se incrementalmente as rodovias projetadas por uma extensão de 50 pixels, tanto nos sentidos esquerda e direita quanto nos sentidos para cima e para baixo. Simultaneamente são necessárias rotações incrementais para varrer a amplitude de 3°, tanto no sentido horário quanto anti-horário. Para o caso em questão, o vetor U ou I fica reduzido a três componentes, isto é, k= 3. Sendo X₀ e Y₀ os parâmetros de translação e α o parâmetro de rotação, então o vetor U pode ser expresso na forma $U = [X_0 \ Y_0 \ \alpha]^T$. Já o vetor I teria variáveis inteiras relacionadas com os respectivos parâmetros do vetor U. Admitindo-se agora que para a sobreposição ótima entre as rodovias extraídas e projetadas é suficiente a adoção de uma resolução de 1 pixel para os dois parâmetros de translação e de 1' de arco para o parâmetro de rotação, tem-se que $\delta U = [1 \text{ pixel} \ 1 \text{ pixel} \ 1']^T$. Nesse caso o espaço de busca seria composto de 3.600.000 (=100.100.360) combinações possíveis de valores possíveis dos parâmetros X₀, Y₀ e α. Isso mostra que mesmo uma dimensionalidade relativamente baixa pode levar a uma complexidade computacional alta. Para evitar a explosão combinatorial, uma técnica apropriada de otimização deve ser usada para resolver o problema de minimização colocado acima. Num problema de otimização um dos elementos fundamentais é a função custo, que para o presente caso é a equação 7 ou 9. O problema de otimização em questão consiste em encontrar um vetor solução que satisfaça a condição 10 ou 11. Vários testes realizados mostraram que a função 7 ou 9 é côncava, isto é, o mínimo global é o único mínimo da função custo em questão. A figura 3 mostra um exemplo de plotagem 3D da equação 7 parametrizada apenas pelos parâmetros X₀ e Y₀, onde tanto estes parâmetros quanto a distância média D estão expressos em pixels. As curvas de nível estão sobrepostas na superfície gerada. O gráfico foi gerado com dados reais, a partir de vários segmentos de rodovias presentes num recorte de uma imagem CBERS 1A. O mínimo global está identificado no gráfico

da figura 3 como um ponto claro.

Figura 3 – Visualização da equação 7 com dois parâmetros (X_0, Y_0)



Quando a função custo é côncava, pode-se resolver eficientemente o problema de otimização através do algoritmo do gradiente descendente, que se baseia na seguinte equação de atualização (KRISHNAMACHARI e CHELLAPA, 1996):

$$U_{i+1} = U_i - \varepsilon \cdot \nabla D \quad (12)$$

onde, U_i é o vetor dos parâmetros com seus valores atuais; U_{i+1} é o vetor dos parâmetros a ser atualizado no passo $i+1$; ε é o vetor que dá a amplitude de atualização do vetor U_i ; e ∇D é o vetor gradiente da função custo $D(X_0, Y_0)$.

O vetor ε deve ser composto por valores reais positivos e suficientemente pequenos. Em geral, seus valores podem ser maiores em áreas de menor curvatura e menores em regiões de curvaturas mais acentuadas. Como o vetor ∇D corresponde a direção local de maior variação da função D num ponto (X_0, Y_0) e, por isso, é normal à curva de nível que passa por este mesmo ponto, a solução obtida através da equação 12 corresponde a uma trajetória que parte de uma posição inicial (U_0) e vai até a posição final (U_f), sempre cortando ortogonalmente as curvas de nível. A figura 3 ilustra uma trajetória (T) deste tipo.

O exemplo ilustrado pelo gráfico da figura 3 serviu para mostrar de forma mais simples a determinação dos parâmetros (X_o , Y_o) que permitem uma sobreposição ótima entre as rodovias extraídas e projetadas. Outros parâmetros podem ser adotados, como por exemplo os seis parâmetros da transformação afim. Nesse caso, a transformação de registro (ou de superposição) seria a transformação afim.

Nesse trabalho os dados básicos de entrada são imagens CBERS 1A, que, na ausência de movimentação excessiva do relevo, possuem boa geometria interna. Assim, as diferenças sistemáticas entre as rodovias extraídas e projetadas podem ser eliminadas através de translações e rotações, combinadas com refinamentos sucessivos dos parâmetros da DLT, conforme metodologia proposta (figura 1).

2.3 Orientação da Imagem usando a DLT

Na orientação da imagem, os pontos correspondentes obtidos no passo anterior (Seção 2.2) são utilizados na determinação dos coeficientes da DLT, que é definida pelo seguinte par de equações (KARARA, 1989):

$$\begin{aligned} L &= L_1.x + L_2.y + L_3.z + L_4 - L.x.L_9 - L.y.L_{10} - L.z.L_{11} \\ C &= L_5.x + L_6.y + L_7.z + L_8 - C.x.L_9 - C.y.L_{10} - C.z.L_{11} \end{aligned} \quad (13)$$

onde:

- (L , C) são coordenadas linha e coluna de um ponto $p \in E$ no espaço-imagem;
- (x , y , z) são as coordenadas de um ponto $A \in P^o$ (correspondente ao ponto p) no espaço-objeto;
- L_1, \dots, L_{11} são os parâmetros de orientação da DLT.

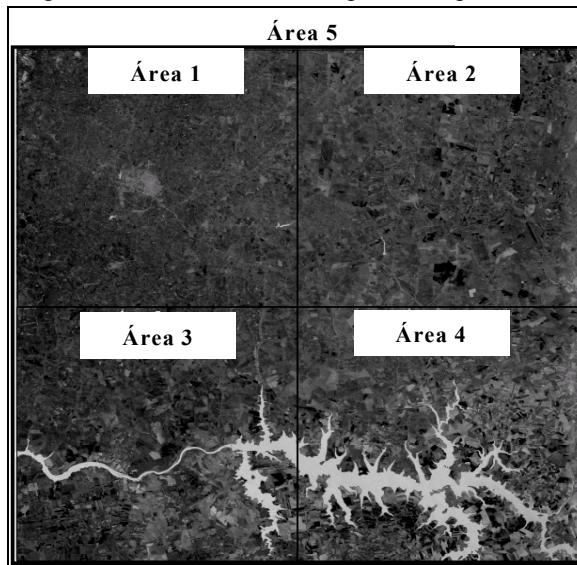
Considerando as coordenadas dos pontos de apoio (x , y , z) e os termos Lx , Ly , Lz , Cx , Cy e Cz como constantes (isto é, sem erro), o resultado é um modelo linear e explícito. Logo, as observações (L , C) podem ser expressas em função dos parâmetros de orientação. Assim pode-se utilizar o método paramétrico (MMQ) para o ajustamento (GEMAEL, 1994). Como neste caso se têm 11 parâmetros, para a solução pelo MMQ são necessários no mínimo 6 pontos de controle para resolver o problema de ajustamento. Entretanto, uma das características da metodologia de orientação proposta é a disponibilidade de um número bastante grande de pontos de apoio, garantindo uma grande redundância e confiabilidade.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

De forma a avaliar a potencialidade da metodologia proposta para a orientação semi-automática de imagens CBERS utilizando rodovias como controle de campo, cinco experimentos foram realizados com uma imagem CBERS que envolve a

região de Presidente Prudente-SP e outras regiões vizinhas. Esta imagem possui resolução de 20 m e foi obtida gratuitamente junto ao sítio http://www.cbers.inpe.br/pt/index_pt.htm. Os dados planimétricos das rodovias de controle de campo foram obtidos junto a empresa Engemap Engenharia e Mapeamento Ltda. Os vértices das linhas poligonais que descrevem as rodovias possuem precisão planimétrica de 1 m. As informações altimétricas destes vértices foram obtidas junto ao modelo global de dados altimétricos SRTM (*The Shuttle Radar Topography Mission*), que pode ser acessado no sítio do sistema SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Conforme se pode verificar no sítio http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/error_abs.jpg, o erro vertical (para 90% de probabilidade) dos dados SRTM para a mesma região da imagem está em torno de 10 m.

Figura 4 – Áreas selecionadas para os experimentos

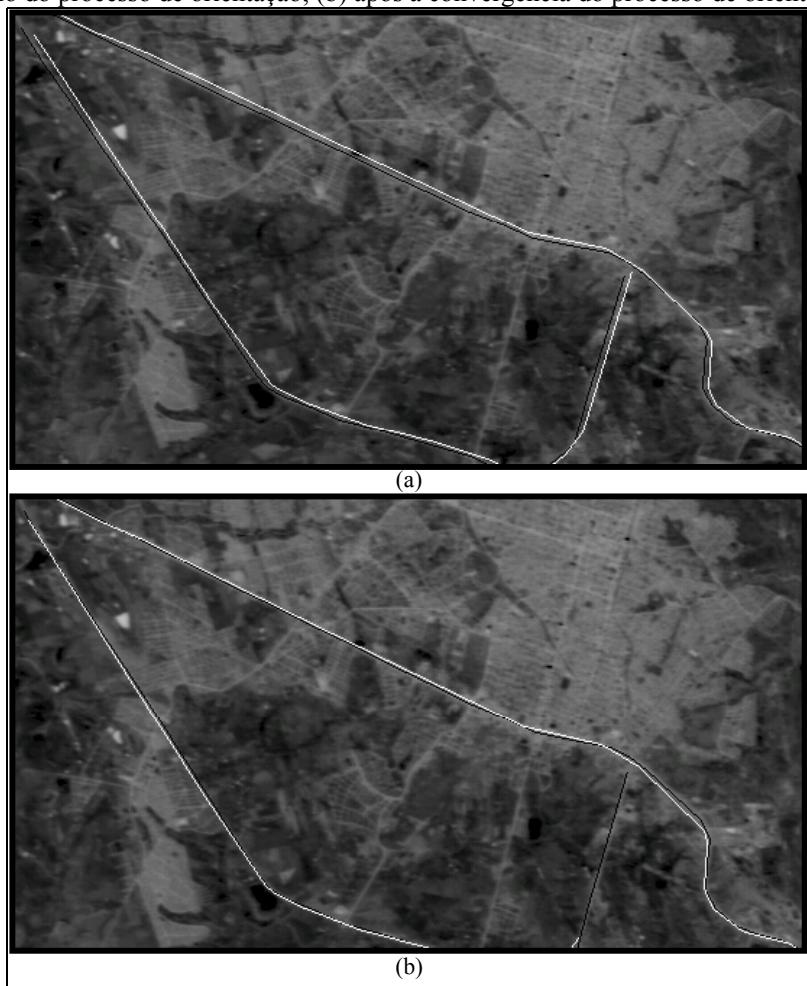


A metodologia proposta foi aplicada em recortes da imagem e na imagem toda. A Figura 4 mostra a imagem CBERS e as áreas selecionadas para os experimentos. A avaliação foi realizada tanto de forma qualitativa quanto quantitativa. A avaliação qualitativa foi realizada com base na interpretação visual das rodovias projetadas na imagem no início do processo de orientação e no final do processo de orientação. A avaliação quantitativa foi realizada de duas formas. Uma delas baseia-se na distância média global entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas no final do processo iterativo de orientação. Essa distância permite avaliar numericamente a qualidade do ajuste global na imagem das rodovias.

envolvidas no processo de orientação. Trata-se então de uma forma de avaliação interna do processo de orientação, na medida de que a referida distância reflete a qualidade da estimativa dos parâmetros da DLT. Em princípio, esta avaliação poderia ter sido feita com base na MVC dos parâmetros estimados da DLT. Entretanto, o caráter aproximado da DLT e a falta de significado físico de seus parâmetros, tornam a MVC dos parâmetros ajustados praticamente inúteis. Uma avaliação externa do processo de orientação usando rodovias de verificação foi também realizada. Baseia-se também numa medida de distância média, só que agora é calculada entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de verificação projetadas na imagem via DLT após a convergência do processo de orientação. A seguir apresenta-se um exemplo baseado num recorte da imagem contendo as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas no início e no final do processo de orientação. No final é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos 5 experimentos.

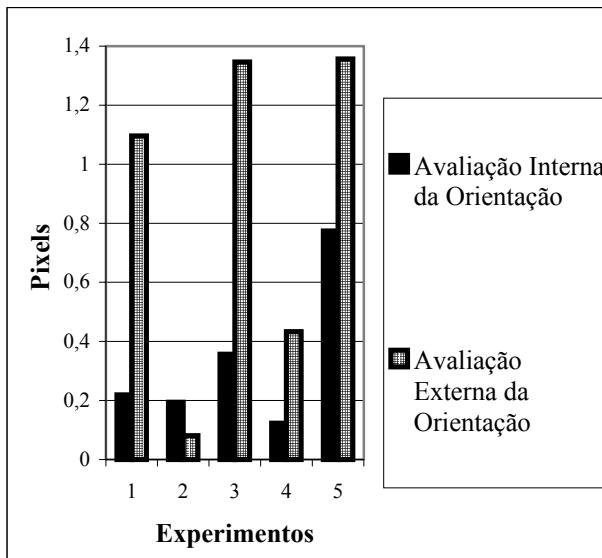
A figura 5 mostra um recorte de imagem da área 1 (figura 4) com alguns segmentos de rodovias. A figura 5(a) mostra o resultado da projeção dos segmentos de rodovias de controle de controle após a orientação aproximada usando a transformação afim e três pontos selecionados de forma aproximada. As rodovias extraídas são mostradas como linhas escuras e as correspondentes projetadas como linhas claras. Pode-se notar que existe um deslocamento sistemático entre as rodovias extraídas e projetadas. A figura 5(b) mostra o resultado final após a convergência do processo de orientação, obtida após a realização de três iterações. Nesse caso, e desde a primeira iteração, a projeção das rodovias de controle é realizada através da DLT, tendo por base os parâmetros estimados na última iteração. A figura 5(b) mostra que um bom resultado final foi obtido pela metodologia, visto que o registro entre as rodovias extraídas e as correspondentes projetadas foi eficiente em quase todos os trechos.

Figura 5 – Recorte da imagem com alguns trechos de rodovias de controle. (a) no início do processo de orientação; (b) após a convergência do processo de orientação



A figura 6 mostra as avaliações interna e externa dos resultados obtidos nos 5 experimentos realizados, conforme áreas testes selecionadas na imagem (figura 4). Na base do gráfico estão identificadas as áreas a que se referem os experimentos realizados. Por exemplo, as duas últimas barras da direita se referem área 5, isto é, a imagem CBERS completa.

Figura 6 – Avaliações interna e externa dos resultados obtidos nos experimentos realizados



A figura 6 mostra que as discrepâncias internas são geralmente bem menores que as externas, com exceção dos resultados obtidos para o segundo experimento, onde ambas as discrepâncias se situaram num nível de significância parecido. Este resultado era esperado face ao critério adotado para avaliação interna do processo de orientação, visto que a própria estratégia de orientação força um ajuste global entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas. Com exceção da discrepância interna obtida no quinto experimento, que ficou ligeiramente abaixo de 0,8 pixel, todas as outras ficaram abaixo de 0,5 pixel. Isso mostra que a estratégia de orientação proposta possibilitou um bom encaixe global das rodovias extraídas com as correspondentes rodovias de controle projetadas. Mostra também que, como esperado, devido principalmente ao uso da DLT para modelar a geometria da imagem, os resultados do processo de orientação da imagem são melhores para os recortes da imagem do que para a imagem toda. As discrepâncias obtidas com uso de trechos de rodovias de verificação se situaram no nível do pixel, com exceção da discrepância obtida no segundo experimento.

Quanto aos padrões de convergência para os experimentos realizados, verificou-se que são semelhantes para os 4 casos envolvendo os recortes das imagens. Em todos estes casos a convergência ocorreu na terceira iteração. A convergência foi mais lenta para o quinto experimento, para o qual foram necessárias 6 iterações. Isso se deve ao fato de que o encaixe global envolvendo

mais rodovias de controle, e também em áreas mais extensas, se estabiliza mais lentamente.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposta uma metodologia para orientação de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. Baseia-se em três etapas principais: extração das rodovias de controle na imagem através do algoritmo de PD; geração automática de pontos de apoio; e orientação da imagem usando a DLT. As duas últimas etapas do processo de orientação são iteradas até que se verifique a estabilização do processo de orientação.

A metodologia proposta foi avaliada com base em cinco experimentos, sendo que um deles foi realizado com toda a imagem CBERS e os outros quatro com recortes dessa imagem. As principais conclusões foram:

- as discrepâncias internas são geralmente bem menores que as externas, fato esperado visto que a própria estratégia de orientação força um ajuste global entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas;
- a estratégia de orientação proposta possibilitou um bom encaixe global das rodovias extraídas com as correspondentes rodovias de controle projetadas, fato evidenciado pelas pequenas discrepâncias internas obtidas, sempre abaixo de 0,8 pixels;
- devido principalmente ao uso da DLT para modelar a geometria da imagem, os resultados do processo de orientação da imagem são melhores para os recortes da imagem do que para a imagem toda;
- os padrões de convergência da metodologia proposta para os experimentos realizados com os recortes da imagem foram semelhantes, sendo que em todos estes casos a convergência ocorreu na terceira iteração; para o experimento com a imagem toda foram necessárias 6 iterações, caracterizando então uma convergência mais lenta que os casos envolvendo recortes da imagem.

Finalmente, dentre as vantagens da metodologia proposta, pode-se destacar:

- A dependência do operador é apenas em tarefas de alto nível, limitando-se ao reconhecimento das rodovias de controle na imagem e ao fornecimento de poucos pontos de forma aproximada;
- É possível a determinação numérica de uma grande quantidade de pontos de apoio, muito além do que é normalmente possível através da identificação visual de pontos de apoio numa imagem de baixa-resolução, a exemplo da imagem teste CBERS utilizada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pela concessão de auxílios para a aquisição

de recursos computacionais usados nesta pesquisa, a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, a Engemap Engenharia e Mapeamento Ltda de Assis-SP pela concessão dos dados planimétricos das rodovias de controle e o INPE pela concessão da imagem CBERS. Vale lembrar também que os dados altimétricos utilizados foram obtidos junto ao sistema SRTM na site <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

REFERÊNCIAS

- BALLARD, D. H.; BROWN, C.M. *Computer Vision*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982, 523 p.
- DAL POZ, A. P. *Processo Automático para Reconhecer e Extrair Rodovias Georreferenciadas de uma Fotografia Aérea Digitalizada*. Relatório de Pesquisa de Pós-Doutorado, Department of Spatial Information Science and Engineering, University of Maine, 2000, p.225.
- DOWMAN, I. J.; MICHALIS, P. *Generic Rigorous Model for along Track Stereo Satellite Sensors*. In: ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, 2003, CDROM.
- EL-MANADILI, Y.; NOVAK, K. *Precision Rectification of SPOT Imagery using the Direct Linear Transformation Model*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 62, 1996, p. 67-72.
- FRITSCH, D.; STALLMANN, D. *Rigorous Photogrammetric Modelling Processing of High-Resolution Satellite Imagery*. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v..33, 2000, p.313-321.
- GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações - Aplicações Geodésicas*. Editora UFPr, 1994.
- HABIB, A.; GHANMA, M.; MITISHITA, E. A. A. *Co-registration of photogrammetric and LIDAR data: Methodology and case study*. Revista Brasileira de Cartografia, v. 56, n. 1, 2004, p. 1-13.
- HATTORI, S.; ONO, T.; FRASER, C.S.; HASEGAWA, H. *Orientation of High-Resolution Satellite Images based on Affine Projection*. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 33, 2000, p. 359-366.
- KARARA, H. M. *Non-Topographic Photogrammetry*. Falls Church, Virginia, USA, 1989, 445p.
- KRISHNAMACHARI, S.; CHELLAPA, R. *Delineating by grouping lines with MRFs*. IEEE Transactions on Image Processing, v. 5, n. 1, 1996, p. 164-168.
- MAIA, J. L. *Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2003.
- MAIA, J. L. *Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas*

- Computacionalmente em Imagens Digitais. Revista Pesquisas em Geociências*, v. 31, n. 1, 2004, p. 29-38.
- MIKHAIL, E; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.
- OKAMOTO, A.; ONO, T.; AKAMATSU, S.; FRASER, C.; HATTORI, S.; HASEGAWA, S. Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery. In: 1999 Annual Conference, 1999, CD-ROM.
- POLI, D. *Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model*. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2004, p. 130-136.
- TAO, C. V.; HU, Y.; MERCER, J. B.; SCHNICK, S.; ZHANG, Y. *Image Rectification using a Generic Sensor Model - Rational Function Model*. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 33, p. 874-881, 2000.
- TAO, C. V.; HU, Y. *3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 68, n. 7, p. 705-714, 2002.

(Recebido em setembro/2006. Aceito em dezembro/2006)

