

LIMIARIZAÇÃO CONTEXTUAL AUTOMÁTICA DE IMAGENS COLORIDAS: APLICAÇÃO NA EXTRAÇÃO DE SEMENTES DE RODOVIA

*Automatic Contextual Thresholding of Color Images: Application in Road
Seed Extraction*

GIOVANE MAIA DO VALE¹
RODRIGO BRUNO ZANIN^{2,3}
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ⁴

Universidade do Estado do Mato Grosso – UNEMAT

¹Rua Aldori Neves Fernandes, 157 - Campus de Colider – MT

²Av. dos Ingás, 3001 – Campus de Sinop - MT

⁴universidade Estadual Paulista – Unesp

Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) – Depto. de Cartografia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC

Rua Roberto Simonsen, 305 - Campus de Presidente Prudente – SP

³Doutorando do PPGCC da FCT/UNESP

giovanemvale@gmail.com; rodrigobrunozanin@yahoo.com.br;

aluir@fct.unesp.br

RESUMO

Neste artigo é proposta uma estratégia totalmente automática para reduzir a complexidade de padrões (vegetação, edificações, solos etc.) que interagem com o objeto 'rodovia' em imagens coloridas, reduzindo conseqüentemente a dificuldade na extração automática desse objeto. A metodologia proposta consiste em três etapas seqüências. Na primeira etapa é aplicado o operador pontual para o cálculo de índice de artificialidade denominado NandA (*Natural and Artificial*). O resultado é uma imagem cujo atributo de intensidade é a resposta do NandA. A segunda etapa consiste na limiarização automática da imagem obtida no passo anterior, resultando numa imagem binária. Esta imagem geralmente permite separar os objetos artificiais e naturais. A terceira etapa consiste em aplicar uma metodologia preexistente para a extração de sementes de rodovia a partir da imagem binária gerada na segunda etapa. Vários experimentos realizados com imagens reais

possibilitaram uma verificação experimental do potencial da metodologia proposta. A comparação dos resultados obtidos, com os correspondentes gerados por uma metodologia para extração de sementes de rodovia em imagens pancromáticas, possibilitou verificar que o principal benefício foi a drástica diminuição do esforço computacional.

Palavras chaves: Limiarização; Extração de Rodovias; Imagens Coloridas; Índice de Artificialidade.

ABSTRACT

In this paper is a totally automatic strategy proposed to reduce the complexity of patterns (vegetation, building, soils etc.) that interact with the object 'road' in color images, thus reducing the difficulty of the automatic extraction of this object. The proposed methodology consists of three sequential steps. In the first step the punctual operator is applied for artificiality index computation known as NandA (Natural and Artificial). The result is an image whose the intensity attribute is the NandA response. The second step consists in automatically thresholding the image obtained in the previous step, resulting in a binary image. This image usually allows the separation between artificial and natural objects. The third step consists in applying a preexisting road seed extraction methodology to the previous generated binary image. Several experiments carried out with real images made the verification of the potential of the proposed methodology possible. The comparison of the obtained result to others obtained by a similar methodology for road seed extraction from gray level images, showed that the main benefit was the drastic reduction of the computational effort.

Key words: Thresholding; Road Extraction; Color Image; Artificiality Index.

1. INTRODUÇÃO

O problema de extração de feições em imagens digitais tem sido, por um longo tempo, um desafio nas mais variadas comunidades científicas. Por exemplo, KOVALEVSKII (1967) utilizou o algoritmo de programação dinâmica para extrair caracteres tipografados em manuscritos. Em TOMMASELLI (1993) o problema de extração de feições retas (segmentos de retas, como arestas internas de edificações) era de importância fundamental para determinar em tempo real a posição e orientação de um sistema de visão estéreo aplicado à visão robótica. Uma aplicação na área médica é encontrada em YAMADA et al. (1998), onde é descrita a extração de glomérulos em imagens de microscópios de seções renais, que são formas geométricas aproximadamente circulares. Em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto o problema de extração de feições tem sido de fundamental importância, há mais de três décadas, na automação dos processos de coletas de feições cartográficas, como edifícios, rios, rodovias etc. Nesta área do conhecimento a

automação é muito difícil devido à alta complexidade das cenas envolvidas, as quais são capturadas através de sensores geralmente embarcados em aeronaves e satélites, como as câmaras CCD (*Charge Coupled Device*) e os sistemas de varredura a laser. Neste contexto, a grande dificuldade é a atribuição do significado ao objeto de interesse (por exemplo, uma rodovia), isto porque é difícil entender e, após, modelar o mecanismo de visão humana num sistema de visão computacional. Após a realização do reconhecimento, o delineamento do objeto de interesse costuma ser mais fácil. Portanto, a tarefa de extração de feições envolve duas subtarefas, isto é, o reconhecimento e o delineamento. Embora estas duas subtarefas nem sempre possam ser separadas em processos de extração de feições, elas são úteis para caracterizar os métodos quanto ao nível de automação. Os métodos automáticos desempenham ambas as tarefas de reconhecimento e de delineamento mas, em se tratando de métodos semi-automáticos, é apenas inerente à tarefa de delineamento, uma vez que o reconhecimento fica a cargo da habilidade interpretativa do operador.

O problema específico de extração de feições rodoviárias começou a ser investigado em meados da década de 1970, quando as imagens digitais do sensor MSS/LANDSAT tornaram-se disponíveis para a comunidade científica. Inúmeras pesquisas foram realizadas desde os trabalhos pioneiros de BAJCSY e TAVAKOLI (1976) e de QUAM (1978). A maior parte das metodologias encontradas na literatura é de concepção semi-automática. Neste caso, cabe ao operador a realização das tarefas de alto nível (por exemplo, o reconhecimento da feição rodovia e fornecimento de alguns pontos sementes) e ao algoritmo computacional a realização do delineamento geométrico. Estratégias baseadas em contorno ativo ou snakes (KASS et al., 1987; NEUENSCHWANDER et al., 1997; AGOURIS et al., 2000) e em otimização por programação dinâmica (MERLET e ZERUBIA, 1996; GRUEN e LI, 1997; DAL POZ e VALE, 2003) são exemplos de metodologias semi-automáticas. Os métodos automáticos tentam evitar totalmente a intervenção humana durante o processo de extração. Algumas metodologias utilizam informações contextuais e propriedades do espaço-escala para extrair rodovias em áreas rurais (BAUMGARTNER et al., 1999; LAPTEV et al., 2000; WESSEL, 2004) e em ambientes urbanos complexos (HINZ e WIEDEMANN, 2004). Outras metodologias baseiam-se em técnicas de otimização, podendo-se citar o uso de contorno ativo para a extração de rodovias em áreas urbanas (YOUN et al., 2004) e o uso de modelos MRF (*Markov Random Field*) para extração de rodovias em áreas rurais a partir de imagens SPOT (STOICA et al., 2004). Técnicas de agrupamento perspectivo também têm sido utilizadas para a extração de rodovias em regiões rurais (BAUMGARTNER, 1999; DAL POZ et al., 2005).

Uma tendência atual de pesquisa é usar dados de diferentes sensores

(pancromáticos, multiespectrais, LIDAR, SAR etc.) para facilitar tarefa de extração automática da malha viária. CLODE et al. (2004) usaram dados LIDAR, tanto de altura quanto de intensidade de retorno de pulso laser, tendo principalmente por base o fato de que o material asfáltico apresenta baixo índice de retorno do pulso laser. ZHU et al (2004) usaram dados LIDAR para detectar regiões de ocorrência de obstruções e assim facilitar a extração de rodovias em ambientes urbanos. HU et al. (2004) também combinaram dados LIDAR e de imagens aéreas, uma vez que é possível, conforme ficou evidenciado pelo exemplo anterior, obter conhecimentos de rodovia que podem se completar, facilitando a tarefa de extração. Um exemplo de uso de imagens multiespectrais no problema de extração automática de rodovias é apresentado em GAO e WU (2004). Primeiramente, uma classificação não supervisionada é aplicada a uma imagem Ikonos para obter uma imagem binária com pixels classificados como pertencente ou não às rodovias. Esta imagem é então utilizada no processo de extração automática de rodovia.

Numa cena, quanto maior o número de padrões (vegetação, edificações, tipo de solos etc.) que interagem com o objeto 'rodovia', maior é a complexidade da imagem que a representa. É por isso que existem estratégias, como a de GAO e WU (2004), que visam diminuir previamente a complexidade do conteúdo da imagem. Neste artigo é proposta uma estratégia baseada na utilização do índice de artificialidade Nanda (*Natural and Artificial*) para segmentar imagens multiespectrais em regiões naturais (vegetação) e artificiais (rodovias e edificações). O parâmetro de limiarização é obtido automaticamente com base em conceitos relacionados com o comportamento de rodovias ao longo do espaço-escala. A imagem segmentada desta forma permite focalizar o processo de extração automática de rodovia nas regiões identificadas como artificiais. A fim de mostrar o benefício desta estratégia na extração automática de rodovia, uma metodologia preexistente (DAL POZ et al., 2005) é aplicada à imagem segmentada para extrair sementes de rodovia. Como este processo de extração é focalizado em regiões artificiais da imagem segmentada, é esperada principalmente uma diminuição na complexidade computacional.

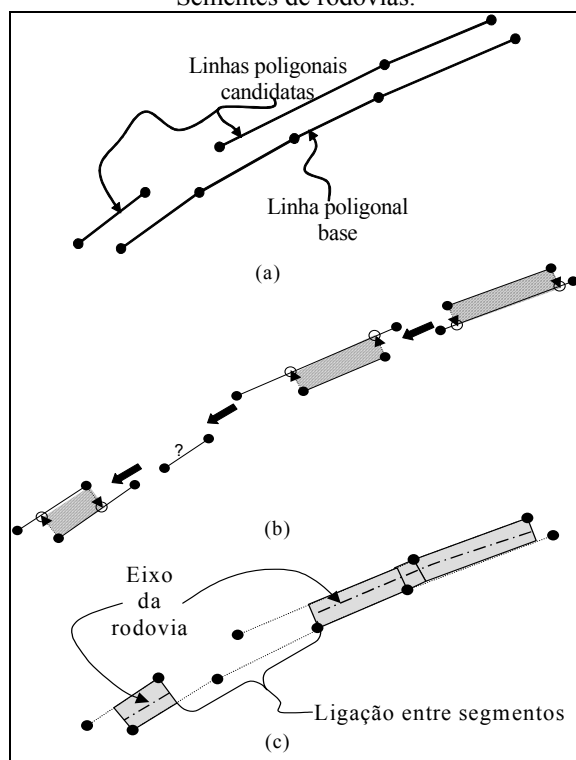
Este artigo está organizado em 5 seções. A seção 2 apresenta uma breve fundamentação teórica relacionada com a metodologia preexistente de extração de sementes de rodovia, com alguns índices de artificialidade existentes e com o princípio de limiarização de imagem. A metodologia proposta é apresentada na seção 3. Os resultados experimentais são apresentados na seção 4. Por último, a seção 5 apresenta as principais conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Extração de Sementes de Rodovia

A extração de sementes (ou segmentos) de rodovia baseia-se num conjunto de quatro objetos semânticos de rodovia e num outro conjunto de regras de conexão entre objetos semânticos. Os objetos semânticos são definidos a partir de segmentos de reta opostos, aproximadamente paralelos, de duas linhas poligonais compatíveis com bordas de rodovia. O processo de extração de linhas poligonais baseia-se em varias etapas seqüências, isto é: a detecção e o afinamento de bordas, a geração de listas ordenadas de pixels de borda e a geração propriamente dita de linhas poligonais (JAIN et al., 1995). Cada semente de rodovia é composta de uma seqüência de objetos semânticos de rodovia conectados, sendo que geometricamente cada seqüência desse tipo pode ser estruturada como uma cadeia de quadriláteros justapostos.

Figura 1 - Exemplo ilustrativo de extração de sementes de rodovias. (a) Linhas poligonais base e candidatas; (b) Extração de objetos semânticos; e (c) Sementes de rodovias.



A fim de possibilitar um entendimento dos princípios básicos desta metodologia, apresenta-se a seguir um exemplo ilustrativo (figura 1). Detalhes sobre a metodologia podem ser encontrados em DAL POZ et al. (2005). Na figura 1(a) tem-se uma linha poligonal base compatível com duas linhas poligonais candidatas. Inicialmente os vértices da linha poligonal base são projetados ortogonalmente nas linhas poligonais candidatas, e vice-versa. Os resultados dessas projeções são representados por pequenas circunferências na figura 1(b). O processo de extração e agrupamento de objetos semânticos é mostrado nas figuras 1(b) e 1(c), respectivamente. Supondo que a linha poligonal base (figura 1(a)) é combinada da direita para a esquerda, dois objetos semânticos são gerados pela combinação com a primeira linha poligonal candidata (figura 1(b)). A conexão destes dois objetos semânticos gera uma primeira semente de rodovia (figura 1(c)) que, por sua vez, pode ser segmentada em três quadriláteros justapostos. Os vértices dos quadriláteros permitem a definição do eixo da semente de rodovia. A combinação da linha poligonal base com a segunda candidata (figura 1(a)) permite gerar uma segunda semente de rodovia, constituída apenas de um quadrilátero (figura 1(c)).

2.2. Índices de Artificialidade

Trabalhando com imagens coloridas RGB, GRÜN (2000) e NIEDERÖST (2000), propuseram um índice que permite a classificação de objetos numa imagem aérea em duas classes: a artificial (construções feitas pelo homem) e a natural (vegetação, sombra, solo exposto etc.). Este índice consiste na obtenção de um grau de artificialidade das feições da cena através do operador DoA (*Degree of Artificiality*), dado pela equação 1, onde R e G são as intensidades dos pixels nas respectivas bandas verde (G) e vermelho (R).

$$DoA = \frac{G - R}{G + R} \quad (1)$$

POLIDORIO et al. (2003) propuseram o índice de artificialidade NandA para realçar a vegetação, deixando-a em tons mais claros enquanto que as edificações e rodovias são levadas para tons mais escuros. Quanto ao solo exposto, a sua tonalidade depende do tipo, que em geral fica numa tonalidade constante e intermediária entre o valor da vegetação e o das edificações. Esta característica poderá gerar problemas no processo de classificação.

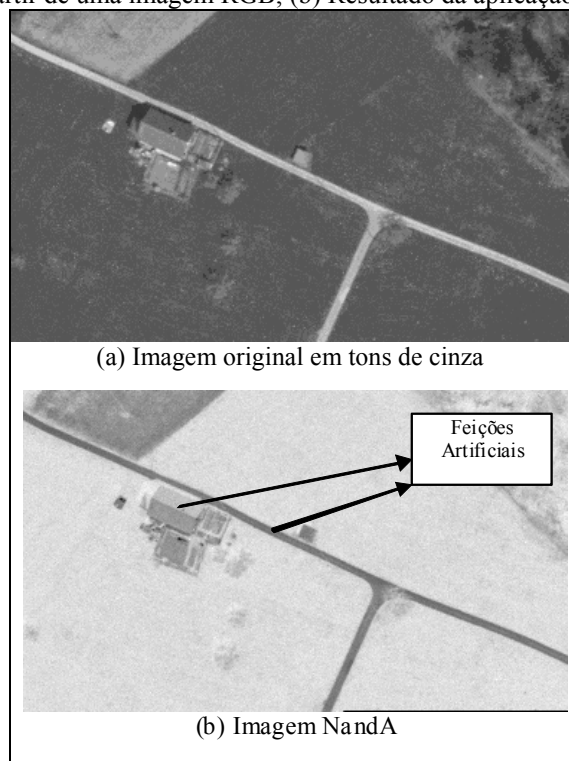
Segundo POLIDORIO et al. (2003), a determinação do NandA, como mostra a equação 2, é mais robusta e computacionalmente mais atraente que o

DoA. No caso do NandA, evita-se operações de divisão e possíveis singularidades pela possibilidade de divisão por zero na equação 1.

$$\text{NandA} = G - (R + B) \quad (2)$$

Um exemplo de aplicação do NandA a uma imagem colorida (a figura 2(a) mostra a correspondente imagem de luminância) é mostrado na figura 2. A figura 2(b) mostra claramente que o NandA possibilitou uma boa separação entre os objetos artificiais (rodovias e edificações) e a vegetação. Entretanto, o solo nu apresentou resposta do NandA próxima dos objetos artificiais, mostrando que não foi possível uma separação ideal entre objetos naturais e artificiais.

Figura 2 - Exemplo de aplicação do NandA. (a) Imagem de luminância obtida a partir de uma imagem RGB; (b) Resultado da aplicação do NandA.



2.3. Princípio de Limiarização de Imagens

Em processamento de imagens as estratégias de limiarização desempenham papel fundamental em processos de segmentação de imagem. Através da limiarização um objeto pode ser separado do fundo, o que normalmente requer um limiar T . Assim, sendo $I(x, y)$ o tom de cinza num pixel (x, y) , pode-se definir uma imagem limiarizada $L(x,y)$ como:

$$L(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{se } I(x, y) > T \\ 0 & \text{se } I(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3)$$

Segundo GONZALES e WOODS (1993), o limiar T pode ser visto como uma função T da forma,

$$T = T[x,y,p(x,y),I(x,y)] \quad (4)$$

onde $p(x,y)$ denota alguma propriedade local no pixel (x, y) , como, por exemplo, o nível de cinza médio de uma vizinhança centrada em (x,y) . Quando T depender apenas de $I(x,y)$, o limiar é denominado global e, quando T depender de $I(x,y)$ e $p(x,y)$, o limiar é denominado dinâmico.

A mais simples de todas técnicas de limiarização é a do particionamento do histograma da imagem por um limiar único T . A segmentação da imagem é efetuada varrendo-se a imagem, pixel por pixel, e rotulando-se cada pixel como sendo do objeto ou de fundo, dependendo se o nível do pixel é maior ou menor que o limiar T . Segundo GONZALES e WOOD (1993), o sucesso deste método depende inteiramente da qualidade do particionamento do histograma.

Um dos aspectos mais importantes na seleção de um limiar de forma automática está ligado às características dos picos que devem ser altos, estreitos, simétricos e separados por vales profundos (GONZALES e WOODS, 1993). Outra característica desejável dos histogramas é a independência das alturas dos picos em relação aos tamanhos dos objetos e do fundo. Por exemplo, se apenas os pixels sobre ou perto da fronteira entre o objeto e o fundo foram usados, o histograma deverá ter dois picos com alturas aproximadamente iguais.

Uma situação mais complexa ocorre quando vários objetos diferentes estão presentes na imagem. Nesse caso, os métodos baseados na determinação de mínimos locais no histograma da imagem devem ser utilizados. Os mínimos locais correspondem aos limiares procurados. No entanto, estes métodos têm limitações quando a forma do histograma é irregular. Este problema pode ser resolvido usando histogramas suavizados (TSAI, 1995).

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste de três etapas seqüências. Na primeira etapa é aplicado o operador pontual de índice de artificialidade NandA. O resultado é uma imagem cujo atributo de intensidade é a resposta do NandA. A segunda etapa consiste na limiarização da imagem obtida no passo anterior, resultando uma imagem binária onde potencialmente os alvos artificiais dos naturais encontram-se separados. É nesta etapa que se encontra a contribuição deste artigo, visto que a limiarização é feita através de um limiar calculado automaticamente com base em conhecimentos sobre o comportamento (denominada NandA) de rodovias no espaço-escala. Esta limiarização é então feita no contexto de rodovia, sendo dessa forma denominada *limiarização contextual automática*. A última etapa consiste em aplicar uma metodologia preexistente para a extração de sementes de rodovia a partir da imagem binária gerada na segunda etapa. Esta metodologia (Seção 2.1) foi desenvolvida originalmente para processar imagens pancromáticas, em vez de imagens binárias como proposto neste artigo. Portanto, a única diferença entre a metodologia original (Seção 2.1) e a que está sendo proposta neste artigo refere-se ao tipo de imagem de entrada. As seções 3.1 e 3.2 mostram como a imagem binária é preparada.

3.1. Geração da Imagem NandA

Os processos de extração de rodovias são bastante dependentes de suas etapas intermediárias, principalmente aquelas relacionadas com a etapa de extração de sementes de rodovias, onde os processamentos de baixo nível, tais como detecção de bordas e linhas, são fatores preponderantes na obtenção de resultados satisfatórios (ZANIN e DAL POZ, 2003). Disto decorre que uma solução bastante atrativa consiste em trabalhar com imagens coloridas, visto que é possível classificar previamente as regiões potenciais da imagem que contêm o objeto de interesse, isto é, rodovias. Com a focalização do processo de extração em regiões específicas da imagem, evita-se uma grande quantidade de detalhes espúrios, normalmente retornados pelos processamentos prévios de baixo nível.

Conforme com o que já foi descrito anteriormente, a utilização de índices de artificialidade permite separar as regiões artificiais e naturais da imagem. Neste trabalho é utilizado o índice de artificialidade NandA. Entretanto, como a metodologia de extração de sementes de rodovia (DAL POZ et al., 2005) pressupõe rodovias em tons claros e bem contrastados em relação às adjacências, utilizou-se de um simples artifício para inverter a imagem originalmente gerada pelo NandA.

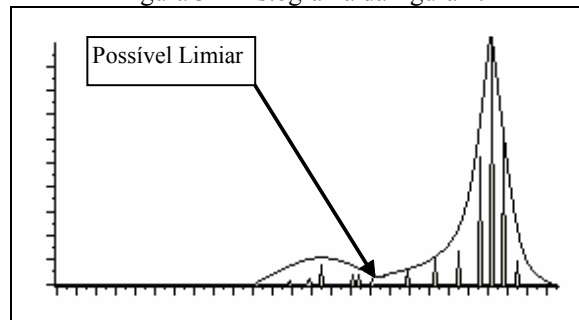
A imagem gerada pela aplicação do índice NandA necessita ser classificada, a fim de possibilitar a geração de uma imagem binária com regiões classificadas em artificiais e naturais. Na seção seguinte é proposta

uma metodologia para classificação da imagem gerada pelo NandA, tendo por base um processo de limiarização, denominado contextual automático.

3.2. Limiarização Contextual Automática

A figura 3 mostra o histograma da imagem apresentada na figura 2, gerada através da aplicação do índice de artificialidade NandA. O pico menor à esquerda corresponde aos objetos escuros. Estes objetos podem não corresponder somente a objetos artificiais (rodovias e edifícios), já que, conforme mostra o próprio exemplo em questão, uma área com solo nu também recebeu tons escuros. Embora o mínimo local entre os dois picos permitiria uma limiarização eficiente da imagem gerada pelo NandA, sua determinação automática não seria tão simples. Visando superar esta dificuldade, propõe-se a determinação deste limiar através de uma heurística ligada ao contexto de rodovia. Esta heurística baseia-se no comportamento das rodovias ao longo do espaço-escala. MAYER e STEGER (1998) demonstraram que rodovias em imagens de alta-resolução manifestam-se como faixas alongadas de pelo menos 7 pixels em escalas finas, tornando-se cada vez mais estreitas, à medida que se avança na direção de escalas mais grosseiras. Uma forma simples e eficiente de gerar um espaço-escala baseia-se na estrutura piramidal de imagens, onde na base se tem a imagem original e na direção do topo se têm imagens de resoluções menores. A última imagem do topo deve possuir uma resolução tal que as rodovias tenham largura entre um e dois pixels, o que é automaticamente fixada em função da largura média das rodovias na imagem original. Diz-se nesse caso que as rodovias têm aparência linear.

Figura 3 - Histograma da figura 2.



O princípio do espaço-escala pode ser utilizado como base para detectar linhas em imagens geradas pelo índice NandA (figura 4). Inicialmente a imagem NandA é reamostrada numa outra em resolução menor, que é o topo da pirâmide, de tal forma que as rodovias tenham no máximo 2 pixels de

espessura. Sendo L a largura média (em pixels) das rodovias na imagem original, a imagem do topo da pirâmide deverá ser reduzida segundo um fator de escala de $2/L$. Assim, se a imagem original possuir NL linhas e NC colunas, a imagem reamostrada terá $\text{int}[(2/L)NL]+1$ linhas e $\text{int}[(2/L)NC]+1$ colunas. Sobre esta imagem é aplicado um detector de linhas. Nesse trabalho foi utilizado o detector de linhas de Canny modificado, que consiste basicamente do algoritmo original de Canny, mas sem a etapa de diferenciação da imagem (JAIN et al., 1995). O algoritmo modificado de Canny busca por pixels mais representativos ao longo de seções transversais das linhas, valendo-se das seguintes etapas: suavização gaussiana para atenuação de ruídos na imagem reamostrada; busca pelos pontos de linha através do algoritmo de supressão não-máxima; e complementação de linhas e eliminação dos segmentos espúrios de linha através do algoritmo de histerese. A figura 4 mostra na janela em destaque as linhas detectadas na imagem NandA reamostrada, onde é possível notar claramente as linhas correspondentes às rodovias. Estas linhas são transformadas para a imagem NandA original (base da pirâmide) invertendo-se o processo geométrico utilizado para a geração da grade da imagem NandA reamostrada (topo da pirâmide). A figura 4 mostra, em preto, as linhas detectadas e superpostas na imagem em tons de cinza. Notar que praticamente restaram somente as linhas correspondentes aos eixos das rodovias. Esse resultado é geralmente obtido porque os detalhes espúrios resultantes do processo de detecção de linhas correspondem a cadeias de pixels bastante curtas. Conseqüentemente, no contexto em questão, onde o interesse é por linhas longas representando eixos de rodovias, o uso de filtros simples baseados na eliminação de cadeias curtas de pixels (por exemplo, de 10 pixels) é bastante eficiente.

Figura 4 - Linhas extraídas na imagem NandA reamostrada.



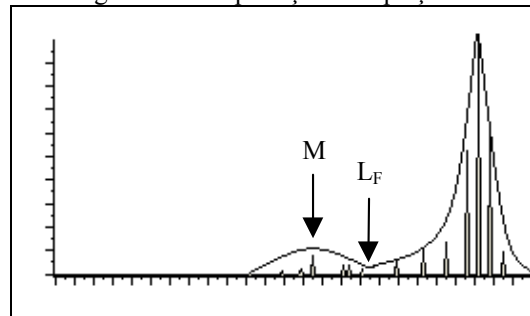
Tendo em vista que o objetivo principal é separar rodovias do fundo, é necessário analisar o comportamento da intensidade dos pixels de rodovia na

imagem NandA. Conforme foi discutido acima, as linhas longas possuem altíssima probabilidade de pertencerem ao leito de rodovia, podendo dessa forma ser utilizadas no cálculo do limiar a ser aplicado à imagem NandA. Assumindo-se que a distribuição de frequência de intensidade dos pixels das linhas longas se dá de forma semelhante a distribuição normal, basta calcular a média (M) e o desvio-padrão (σ) das intensidades para obter uma descrição matemática do comportamento dos pixels de rodovia na imagem NandA. Esta descrição está normalmente relacionada com um pico menor mais à esquerda do histograma da imagem. Conforme se pode verificar pelo exemplo mostrado na figura 4, a seguinte fórmula poderá ser utilizada para o cálculo do limiar (L_F),

$$L_F = M + 3\sigma \quad (5)$$

Se a hipótese de normalidade de intensidade dos pixels do leito das rodovias for verdadeira e, além disso, nenhum outro objeto na imagem NandA apresentar intensidade semelhante ou mais escura, o valor de L_F dado pela equação 5 garantiria que aproximadamente 99,9% dos pixels de rodovia sejam separados dos demais. O significado teórico da equação 5 pode ser discutido com base no histograma da imagem NandA, conforme mostra a figura 5. Se as rodovias possuírem apenas pixels em tons claros na imagem NandA, o pico menor à esquerda do histograma corresponderia à distribuição de frequência de intensidade dos pixels de rodovia. A média M está localizada no centro do pico e o vale entre os dois picos corresponde aproximadamente ao valor dado pela equação 5.

Figura 5 - Interpretação da equação 5.



Como a situação ideal colocada acima não ocorre na realidade, uma vez que outros objetos também podem se manifestar na imagem NandA com intensidade semelhante, e até mais escuros, outros objetos são separados junto

com o objeto rodovia. A figura 6 ilustra bem esta situação. Nesta figura, a imagem binária gerada pela limiarização da imagem NandA (figura 2) negativa, usando o limiar definido pela equação 5, mostra que as rodovias foram eficientemente classificadas. Entretanto, como esperado, outros objetos artificiais, como as edificações, são inseridos na mesma classe. Este exemplo mostra também que objetos naturais, como solo nu, podem ser interpretados na mesma classe das rodovias.

Figura 6 - Imagem binária gerada pela limiarização contextual da imagem NandA negativa.

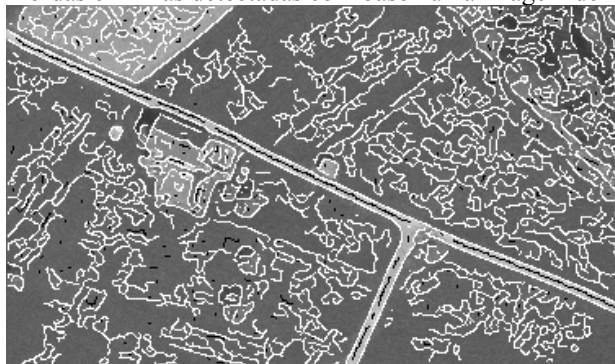


3.3. Extração de Sementes de Rodovias em Imagens Binárias

A metodologia para a extração de sementes de rodovias, brevemente descrita na Seção 2, foi originalmente desenvolvida para trabalhar com imagens pancromáticas. Principalmente quando estas imagens são de altíssima resolução, o esforço computacional é bastante grande. Isso ocorre porque nas etapas iniciais do processo não se detecta somente bordas de rodovias, mas inúmeras outras bordas, inclusive as que não têm significado físico. A figura 7 ilustra bem a dificuldade da metodologia de extração de sementes de rodovia quando existe uma enorme quantidade de bordas não relacionadas com rodovias. As bordas (linhas claras na figura 7) foram detectadas diretamente na imagem de luminância gerada a partir de uma imagem colorida. Já as linhas (em preto na figura 7) foram detectadas utilizando a estratégia do espaço-escala descrita acima.

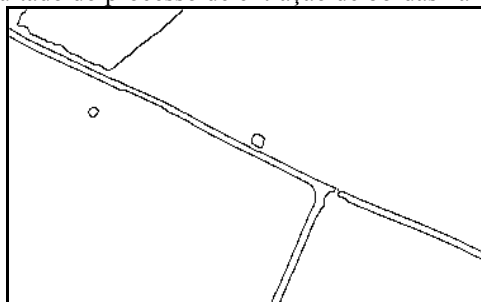
Uma forma eficiente de reduzir drasticamente o espaço de busca inerente à metodologia de extração automática de sementes de rodovia é utilizar uma imagem binária (como a da figura 6) com objetos artificiais e naturais separados, em vez de se utilizar uma imagem pancromática, como foi proposto originalmente em DAL POZ et al. (2005).

Figura 7 - Bordas e Linhas detectadas com base numa imagem de luminância.



A figura 8 mostra claramente o benefício de se detectar as bordas diretamente na imagem binária. Uma simples comparação visual com a figura 7 mostra a enorme redução do espaço de busca propiciada pela metodologia proposta, que visa basicamente separar, numa etapa previa de pré-processamento, as feições artificiais e naturais.

Figura 8 - Resultado do processo de extração de bordas na imagem binária.



A figura 9 mostra o resultado final para a imagem exemplo, onde as linhas poligonais, correspondentes às bordas de rodovias, estão superpostas na imagem de tons de cinza.

Figura 9 - Resultado final do processo de extração de sementes de rodovias.



4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A metodologia proposta para a limiarização automática de imagem NandA foi implementada em C++ e integrada a uma biblioteca preexistente, específica para a extração automática de sementes de rodovias. O programa resultante permite, dentre outras coisas, a superposição das rodovias extraídas na imagem de entrada e o cálculo do tempo de processamento de todo o processo. O tempo de processamento é um parâmetro importante para a avaliação da metodologia, visto que a grande vantagem esperada para a metodologia proposta é a drástica redução do esforço computacional.

Com o objetivo de analisar os pontos fortes e fracos da metodologia proposta, três imagens aéreas coloridas de alta-resolução e de diferentes graus de dificuldade foram selecionadas. As duas primeiras imagens teste apresentam conteúdos bastante relacionados com vegetação em geral, sendo portanto mais factíveis à separação de objetos artificiais e naturais. A terceira imagem teste apresenta um potencial menor de separação entre estas duas classes de objeto, visto que a parcela de solo nu, ou com vegetação rala, é grande.

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta à primeira imagem teste (443 x 937 pixels) são mostrados na figura 10. Embora a rodovia seja bem contrastada em relação ao fundo, existem obstruções perspectivas e sombras, além de entradas de acesso para uma edificação. Esses são os locais potenciais para ocorrências de falhas da metodologia de extração de sementes de rodovia. As linhas poligonais que deram origem às sementes

de rodovia estão sobrepostas em tons claros na imagem.

Figura 10 - Resultado obtido com a primeira imagem teste.

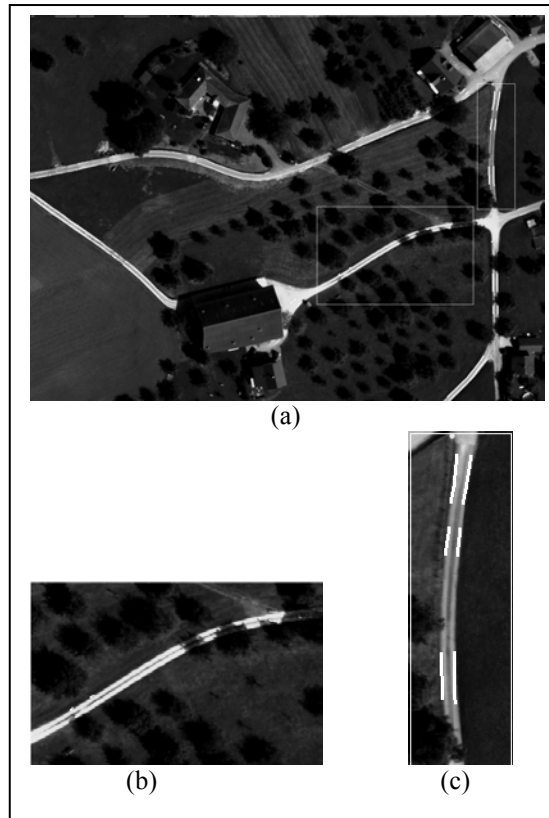


Como pode ser visto na figura 10, o resultado é bastante satisfatório porque as falhas verificadas eram esperadas, já que o método de extração de sementes de rodovia não funciona onde uma ou ambas as bordas de rodovia estão ausentes. Como também já era esperada, a grande vantagem da aplicação da metodologia de extração de sementes de rodovia à imagem NandA limiarizada, em vez de aplicá-la a imagem de tons de cinza, é a drástica redução do esforço computacional. Este fato é claramente demonstrado pela comparação do tempo de processamento, usando o mesmo recurso computacional, para ambas as opções de extração de sementes de rodovia. Enquanto que a metodologia original, baseada na imagem pancromática, necessita de 29 segundos para processar a imagem de tons de cinza, todo o processo aqui proposto tomou apenas 3 segundos. Os resultados obtidos por ambas as metodologias são bastante similares.

Os resultados obtidos com a segunda imagem teste (1260 x 940 pixels) são apresentados na figura 11. Essa imagem apresenta um nível de dificuldade bem maior que a anterior. Alguns exemplos de irregularidades são: múltiplas obstruções; segmento de rodovia com vegetação ao longo de seu eixo (figura 11(b)); segmento de rodovia com resposta radiométrica muito próxima da vegetação lateral (figura 11(c)) etc.. As irregularidades mostradas em destaque nas figuras 11(b,c) resultam do fato das rodovias serem não asfaltadas. Ambos os casos de irregularidade afetam negativamente o cálculo do parâmetro de limiarização. Como este cálculo baseia-se na média e no desvio-padrão dos tons de cinza de pixels pertencentes às linhas detectadas na imagem NandA, reamostrada em baixa resolução, um limiar bem maior que o necessário é estimado. Conseqüentemente, a imagem binária conterá regiões classificadas como naturais no próprio leito de rodovia. Como isto ocorre nas janelas

destacadas na figura 11, poucas sementes de rodovia são extraídas nas regiões correspondentes às janelas mostradas nas figuras 11(b,c). O desempenho da metodologia foi satisfatório nas demais regiões da imagem, falhando em locais previstos, como os que estão afetados por obstruções.

Figura 11 - Resultado obtido com a segunda imagem teste. (a) Imagem teste 2 com os resultados superpostos; (b) Janela mostrando vegetação no centro da rodovia; e (c) Janela mostrando resposta radiométrica próxima da vegetação lateral.

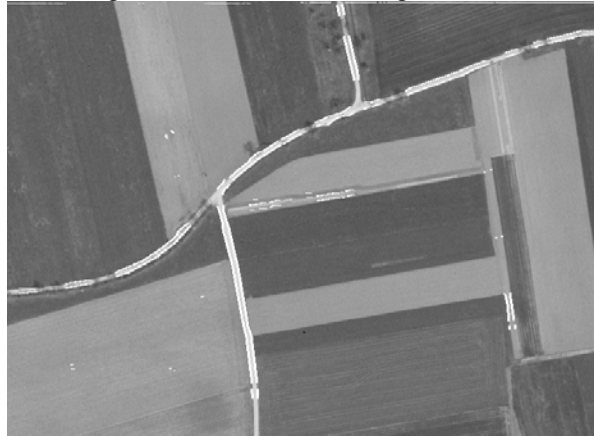


Este experimento (figura 11) mostra ainda de forma mais clara que a grande vantagem da metodologia proposta é a drástica diminuição do esforço computacional, visto que apenas 20 segundos foram gastos para realizar todas as etapas da metodologia proposta, contra aproximadamente 10 minutos de processamento gastos com a metodologia original, baseada em imagens

pancromáticas. A qualidade dos resultados obtidos por ambas as metodologias não diferem significativamente.

A figura 12 apresenta os resultados obtidos com a terceira imagem teste (530 x 717 pixels). A presença de várias regiões com solo exposto e o baixo contraste das rodovias em relação ao fundo representam dificuldades extras em relação aos experimentos anteriores. Isto ocorre porque, nesta situação, a metodologia de limiarização automática da imagem NandA tem sua eficiência prejudicada. Conseqüentemente, a metodologia não se mostrou tão robusta, já que um certo número de falsos positivos foi extraído junto com as sementes de rodovia. Este experimento mostra que as metodologias de complementação automática da estrutura de sementes de rodovia devem não somente reconstruir a estrutura geométrica e topológica da malha viária, mas também devem detectar e eliminar os falsos positivos.

Figura 12 - Resultado da imagem teste 3.



O resultado obtido pela aplicação da metodologia proposta (figura 12) apresenta um número menor de falsos positivos quando comparado ao resultado obtido pela aplicação da metodologia de extração de segmentos de rodovia diretamente na imagem pancromática. A exemplo dos experimentos anteriores, também houve um ganho significativo em termos de tempo de processamento, visto que a metodologia proposta necessitou de 39 segundos para todo o processamento e a metodologia original gastou 1 minuto e 13 segundos para realizar a mesma tarefa. Isso significa aproximadamente 50% de economia de tempo computacional. Entretanto, a economia nos experimentos anteriores é bem superior, já que os tempos de execução para o primeiro experimento e para o segundo experimento foram respectivamente de 10% e de 3% dos tempos gastos pela metodologia baseada em imagens

pancromáticas. Este resultado está diretamente relacionado com a capacidade da metodologia de limiarização automática de imagem NandA em separar objetos artificiais e naturais, que é bem maior para as imagens usadas nos dois primeiros experimentos. Entretanto, a metodologia de limiarização automática proposta possibilitou um ganho maior no que se refere à diminuição de falsos positivos em imagens com conteúdo semelhante ao encontrado na terceira imagem teste.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada e avaliada uma metodologia para reduzir a complexidade de padrões (vegetação, edificações, solos etc.) que interagem com o objeto 'rodovia' em imagens coloridas, visando principalmente à redução do espaço de busca gerado por uma estratégia preexistente para a extração de rodovias. O principal diferencial da metodologia proposta, em relação às estratégias similares para a limiarização de imagens geradas pela aplicação de índices de artificialidade, é o cálculo do parâmetro de limiarização de forma totalmente automática, valendo-se para tanto da análise do comportamento do objeto rodovia ao longo do espaço-escala. Embora existam outras técnicas eficientes para resolver o mesmo problema, como a de Otsu (1979), a técnica proposta incorpora conhecimentos específicos sobre o objeto de interesse.

Para a avaliação da metodologia proposta foram utilizadas três imagens aéreas coloridas de alta-resolução e de diferentes graus de dificuldades. Procurou-se através desses experimentos avaliar os benefícios da estratégia proposta de limiarização automática no processo preexistente de extração de sementes de rodovias, principalmente no que se refere aos quesitos de esforço computacional e de confiabilidade. Dois dos experimentos realizados mostraram que a metodologia de limiarização automática possibilitou uma economia computacional superior a 90% na extração de sementes de rodovias, mas com resultados bem parecidos com os que foram obtidos usando imagens pancromáticas. Esses resultados mostram que a metodologia de limiarização teve um excelente desempenho na separação do objeto rodovia dos demais objetos. O outro experimento foi realizado através de uma imagem com conteúdo não muito favorável tanto à metodologia de limiarização automática quanto à metodologia de extração de sementes de rodovias. Nesse caso, a imagem teste possui várias regiões com solo exposto e o baixo contraste das rodovias em relação ao fundo. Embora esta situação resulte numa menor separação das rodovias em relação aos demais objetos, uma diminuição significativa do esforço computacional (cerca de 50%) foi verificada. Além disso, a metodologia de limiarização automática possibilitou um isolamento de regiões críticas para a extração de sementes de rodovia. Conseqüentemente, foi possível também uma diminuição do número de falsos positivos. Portanto,

pode-se concluir que geralmente a metodologia de limiarização automática propicia uma significativa redução do esforço computacional da metodologia de extração de sementes de rodovias e, em algumas situações, uma melhoria de confiabilidade dos resultados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A. Uncertainty in Image-Based Change Detection. In: *Accuracy 2000*, Proceedings. Amsterdam, p. 1-8, 2000.
- BAJCSY, R; TAVAKOLI, M. Computer Recognition of Roads from Satellite Pictures. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetic*, v. 6, n. 9, p.76-84, 1976.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 66, n. 7, p. 777-785, 1999.
- CLODE, S.; KOOTSOOKOS, P.; ROTTENSTEINER, F. The automatic extraction of roads from LIDAR data. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Istanbul, v.35, Comm. III/3, p. 231-237, 2004.
- DAL POZ, A. P. ; VALE, G. M.; ZANIN, R. B. Automatic extraction of road seeds from high-resolution aerial images. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, RJ, v.77, n.3, p. 509-520, 2005.
- DAL POZ, A. P.; VALE, G. M. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high- resolution images. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Munich, v.34, Comm. III/4, p. 87-91, 2003.
- GAO, J.; WU, L. Automatic Extraction of Road Networks in Urban Areas from Ikonos Imagery Based on Spatial Reasoning. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Istanbul, v.35, Comm. III/3, p. 331-337, 2004.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1993.
- GRÜEN, A.; LI, H. Semi-Automatic Linear Feature Extraction by Dynamic Programming and LSB-Snakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- GRÜN, A. Semi-Automated Approaches to Site Recording and Modeling. In: *International Society For Photogrammetry And Remote Sensing*, Amsterdam, v. 33, Part B5/1, p. 309-318, 2000.
- HINZ, S.; WIEDEMANN, C. Increasing Efficiency of Road Extraction by Self-Diagnosis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 70, n. 12, p. 1457-1464, 2004.

- HU, X.; ZHANG, Z.; TAO, C. V. A Robust Method for Semi-Automatic Extraction of Road Centerlines Using a Piecewise Parabolic Model and Least Square Template Matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 70, n. 12, p. 1393-1398, 2004.
- JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. *Machine Vision*. New York: MIT Press and McGraw-Hill, 549 p, 1995.
- KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. Snakes: Active Contour Models. In: *International Conference of Computer Vision*, Tampa, p. 259-268, 1987.
- KOVALEVSKII, V. A. An optimal recognition algorithm for some sequences of patterns. *Cybernetics and systems analysis*, v. 3, n. 4, p. 62-66, 1967.
- LAPTEV, I., MAYER, H., LINDBERG, T., ECKSTEIN, W., STEGER, C., BAUMGARTNER, A., Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. *Machine Vision and Applications*, n. 12, v. 1, p. 22-31, 2000.
- LAPTEV, I.; MAYER, H.; LINDBERG, T.; ECKSTEIN, W.; STEGER, C.; BAUMGARTNER, A. Automatic Extraction of Roads from Aerial Images Based on Scale Space and Snakes. *Machine Vision and Applications*, v. 12, n. 1, p. 22-31, 2000.
- MAYER, H.; STEGER, C. Scale-space events and their link to abstraction for road extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 53, n. 2, p. 62-75, 1998.
- MERLET, N.; ZERUBIA, J. New Prospects in Line Detection by Dynamic Programming. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 18, n. 4, p. 426-431, 1996.
- NEUENSCHWANDER, W. M.; FUA, P.; IVERSON, L.; SZEKELY, G.; KUBLER, O. Ziplock Snakes. *International Journal of Computer Vision*, v. 25, n. 6, p. 191-201, 1997.
- NIEDERÖST, M. Detection and Reconstruction of Buildings for a 3-D Landscape Model of Switzerland. In: <http://photogrammetry.ethz.ch/>, 2000.
- OTSU, N. A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics*, v. 9, p. 62-66; 1979.
- POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C. Realce do Grau de Artificialidade de Feições em Imagens Aéreas Coloridas. In: *Anais do III Colóquio de Ciências Geodésicas*, Curitiba - PR, 2003.
- QUAM, L. H. Road Tracking and Anomaly Detection in Aerial Imagery. In: *Image Understanding Workshop*, London, p. 51-55, 1978.
- STOICA, R.; DESCOMBES, X.; ZERUBIA, J. A Gibbs Point Process for Road Extraction from Remotely Sensed Images. *International Journal of Computer Vision*, v. 57, n. 2, p. 121-136, 2004.

- TOMMASELLI, A. M. G. *Um método recursivo aplicado ao problema de localização em Visão de Máquina*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 1993.
- TSAI, D. M., A fast thresholding selection procedure for multimodal and unimodal histograms. *Pattern Recognition Letters*. v. 16, n. 6, p. 653–666, 1995.
- WESSEL, B. Road Network Extraction from SAR Imagery Supported by Context Information. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Istanbul, v.35, Comm. III/4, p.360-366, 2004.
- YAMADA, T., SAITO, H., OZAWA, S. 3D reconstruction of skin surface from image sequence. In: *Workshop of Machine Vision Applications*, p. 384-7, 1998.
- YOUN, J.; BETHEL, J. S. Adaptive Snakes for Urban Road Extraction. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Istanbul, v.35, Comm. III/4, p.465-471, 2004.
- ZANIN, R. B.; DAL POZ, A. P. Metodologia automática para extração de cruzamento de rodovias em imagens de alta resolução. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, RJ, v. 55, n. 2, p. 55-65, 2003.
- ZHU, P.; LU, Z.; CHEN, X.; HONDA, K.; EIUMNOH, A. Extraction of City Roads Through Shadow Path Reconstruction Using Laser Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.70, n.12, p. 1433-1440, 2004.

(Recebido em março/07. Aceito em outubro/07)