

# **DETECÇÃO E RECONSTRUÇÃO AUTOMÁTICA DE JUNÇÕES DE RODOVIA EM IMAGENS DIGITAIS DE CENAS RURAIS**

*Automatic detection and reconstruction of road junctions in digital  
images of rural scenes*

MARCO AURÉLIO OLIVEIRA DA SILVA<sup>1</sup>  
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas-  
FCT/UNESP

<sup>2</sup>Departamento de Cartografia - FCT/UNESP  
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil  
mac\_aurelio@prudente.unesp.br; aluir@prudente.unesp.br

## **RESUMO**

Este artigo apresenta uma metodologia para a detecção e a reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. O método requer que os segmentos de rodovia ligando as regiões de junção sejam previamente extraídos através de uma metodologia semi-automática. O método baseia-se em duas etapas sequenciais. Na primeira etapa, as regiões potenciais de junções de rodovia são detectadas através dos critérios de proximidade e de homogeneidade radiométrica. O critério de proximidade detecta agrupamentos de pontos pertencentes aos segmentos de rodovia que estejam distantes entre si a uma distância máxima. O critério de homogeneidade radiométrica verifica se a região delimitada pelos pontos detectados pelo primeiro critério é radiometricamente compatível com o leito de rodovia. Os pontos dos agrupamentos que satisfizerem esse critério são aceitos como pertencentes às junções de rodovia. Na segunda etapa quatro modelos de junção de rodovia são usados para representar as formas típicas de ocorrência de junção em imagens de cenas rurais. Estes modelos permitem a reconstrução das junções detectadas na etapa anterior. O processo de reconstrução de junção de rodovia consiste no cálculo do ponto mais representativo do centro geométrico da região de junção e no estabelecimento das conexões entre este ponto e os pontos da região de junção detectados na etapa anterior do método. Os resultados experimentais comprovaram que o método proposto é uma ferramenta de pós-processamento bastante útil para a complementação automática da malha viária.

## ABSTRACT

This paper presents a methodology for automatic detection and reconstruction of road crossings in digital images from rural scenes. The method requires that road segments connecting road crossing regions to be previously extracted by an available semi-automatic road extraction methodology. The method is based on two sequential steps. At first step, the potential road crossings are detected by applying the proximity and radiometric homogeneity criteria. The proximity criterion aims at detecting groupings of points belonging to road segments, whose distances do not exceed an upper bound. Grouping points satisfying this criterion are accepted as members of respective road crossing. After that, four road crossing models are used to represent typical road crossing occurrences in images from rural scenes. These models allow the road crossings previously detected to be reconstructed. The process of road crossing reconstruction consists in computing the most representative point of geometric center of road crossing region and in geometrically connecting this last point to all grouping points detected in the first step. Experimental results proved that the proposed method is a useful post-processing tool for automatic road network completion.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de métodos para coletar eficientemente dados espaciais a partir de imagens aéreas e de satélite é atualmente um dos principais focos de pesquisa em Fotogrametria. Essa meta é também um enorme desafio porque implica na automação dos processos fotogramétricos. A ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) vem se preocupando, através da Comissão III (*Theory and Algorithms*) e respectivos Grupos de Trabalhos (por exemplo, o WG/4 – *Automated object extraction*), com o tema há, pelo menos, uma década. A maior parte dos esforços nessa área tem recaído sobre a extração de edificações e rodovias.

Em se tratando de métodos para a extração de rodovias, a grande maioria dos métodos existentes focam sobre estratégias semi-automáticas, isto é, aquelas que necessitam, de alguma forma, da intervenção do operador. A razão básica para isto é a grande dificuldade em substituir a habilidade nata do ser humano em tarefas que requerem a integração de informação contextual e de conhecimento *a priori* do objeto rodovia. Uma metodologia digna de nota é encontrada em BAUMGARTNER et al. (1999), em que informações contextuais, técnicas de agrupamento perceptivo e diferentes resoluções são usadas para extrair a malha viária em imagens de alta resolução. Uma outra metodologia para a extração automática da malha viária, mas específica para imagens de baixa resolução, é descrita em WANG e TRINDER (2000). Basicamente, o método usa técnicas de detecção e extração de linhas para encontrar as candidatas às rodovias e conhecimento *a priori* sobre malha viária para eliminar as falsas rodovias. De uma forma geral, as metodologias automáticas para a extração de rodovia estão ainda longe de um estágio maduro e, dessa forma, também longe de serem empregadas em

procedimentos práticos. O panorama é bem mais promissor em relação às metodologias semi-automáticas, pelo simples fato do operador poder supervisionar desde a inicialização até a reparação de possíveis falhas do processo de extração. São duas as categorias de métodos semi-automáticos. Uma primeira inclui os delineadores sequenciais, nos quais apenas informações locais são usadas para traçar sequencialmente as rodovias (MCKEOWN e DENLINGER, 1988, VOSSELMAN e KNECHT, 1995, DAL POZ e SILVA, 2002a,b). A segunda categoria inclui contorno ativo (KASS et al., 1987, NEUENSCHWANDER et al., 1997, GRUEN e LI, 1997, AGOURIS et al., 2000) e otimização por programação dinâmica (MERLET e ZERUBIA, 1996, GRUEN e LI, 1997, DAL POZ e AGOURIS, 2001). Estes métodos têm em comum o fato de utilizarem estratégias de otimização global, onde informações de toda a extensão da rodovia são utilizadas simultaneamente. Por esta razão, estes métodos são às vezes denominados delineadores globais.

Uma preocupação muito raramente presente nas metodologias de extração de rodovia é a detecção e a reconstrução automática de junções de rodovia (BARSÍ et al., 2002). Uma das razões é a grande dificuldade para tratar o problema, haja visto a enorme variabilidade dos casos envolvendo junções de rodovia. Consequentemente, é difícil usar conhecimento *a priori* para detectar e extrair junções. A situação é oposta em relação aos métodos de extração de segmentos de rodovia ligando regiões de junção, devido à possibilidade de se usar conhecimentos *a priori* bem definidos e que, em boa parte dos casos, permitem aos métodos de extração a obtenção de resultados bastante satisfatórios. Em vista desta perspectiva, quase tudo que se encontra na literatura especializada prioriza a extração de segmentos de rodovia, em detrimento quase que total da reconstrução da topologia da malha viária, que depende fundamentalmente da detecção e reconstrução de junções entre rodovias. Dentre os raros trabalhos realizados sobre a detecção e a extração de junções, destaca-se inicialmente o método proposto em BAUMGARTNER et al. (1999). Neste método, rodovias extraídas em imagem aérea de alta resolução (*pixels* < 0,7 m) e linhas extraídas na correspondente imagem reamostrada em baixa resolução são combinadas para detectar e extrair automaticamente tipos complexos de junções entre rodovias. Em BOICHIS et al. (1998) e BOICHIS et al. (2000) foram utilizados conhecimentos *a priori*, modelados a partir das ocorrências típicas de junções de rodovias presentes em dados de SIG (Sistema de Informações Geográficas), para detectar e extrair automaticamente junções de rodovias em imagens aéreas. TEOH e SOWMYA (2000) propuseram um método baseado numa série de regras para identificar e extrair junções em imagens aéreas de alta resolução. As regras são formuladas com base em atributos calculados a partir dos segmentos de rodovia envolvidos nas junções, como, por exemplo, o número de segmentos concorrentes e os ângulos formados entre eles. Em BARSÍ et al. (2002) é proposto um método baseado em

redes neurais para detectar e extrair junções de rodovia em imagens de média resolução (*pixels* da ordem de 0,7 m).

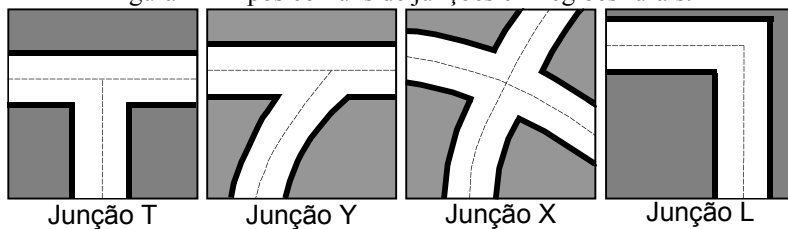
Neste trabalho é apresentada uma metodologia para detectar e extrair junções de rodovias rurais extraídas semi-automaticamente. Os métodos semi-automáticos para a extração de rodovia geralmente necessitam da intervenção de um operador para inicializar o processo através de alguns pontos sementes, para corrigir eventuais falhas durante ou após o processo de extração e para a reconstrução das junções de rodovia, que se dá geralmente após a finalização do processo de extração dos segmentos de rodovia. Portanto, a grande motivação deste trabalho é a redução da necessidade de intervenção do operador junto ao processo de extração da malha viária, aumentando dessa forma o nível de automação das estratégias semi-automáticas.

A estratégia proposta para a reconstrução de junções de rodovia é apresentada na Seção 2. A Seção 3 apresenta os resultados experimentais. Finalmente, as principais conclusões são apresentadas na Seção 4.

## 2. METODOLOGIA PARA A RECONSTRUÇÃO DE JUNÇÕES DE RODOVIA EM IMAGENS AÉREAS DE CENAS RURAIS

Algumas metodologias semi-automáticas para a extração de rodovias, como as baseadas em otimização por programação dinâmica e por contorno ativo, geralmente possibilitam a extração acurada e confiável de segmentos de rodovias ligando regiões de junção. Ao operador basta apenas o posicionamento de pontos sementes nas proximidades das regiões de junção e, às vezes, em algumas regiões críticas situadas ao longo dos segmentos de rodovia selecionados para extração. Em vista disso, uma das hipóteses assumidas no desenvolvimento da metodologia proposta para a reconstrução de junções baseia-se no potencial dos métodos semi-automáticos. Isto é, supõe-se que as extremidades dos segmentos previamente extraídos estejam posicionadas nas proximidades das regiões de junção. Nestas condições, quatro modelos de junção podem ser usados para representar e reconstruir as formas típicas de ocorrência de junção de rodovia em imagens de cenas rurais (figura 1): modelo em “L”, modelo em “T”, modelo em “X” e modelo em “Y”.

Figura 1 – Tipos comuns de junções em regiões rurais.



A seguir é proposta uma solução computacional para resolver o problema de reconstrução automática de junção de rodovia a partir de modelos de junção mostrados na figura 1. O método baseia-se em duas etapas. Numa primeira etapa são identificadas as regiões de ocorrência de junções de rodovia. Na segunda etapa é realizada a identificação dos modelos de junção que melhor se adaptam com as regiões previamente detectadas e, por conseguinte, a reconstrução da malha viária.

## 2.1 IDENTIFICAÇÃO DAS REGIÕES DE JUNÇÃO

A metodologia para a identificação dos locais onde ocorrem junções de rodovia baseia-se nos resultados gerados por algum delineador semi-automático de rodovias, como, por exemplo, o delineador baseado no algoritmo de programação dinâmica (DAL POZ e AGOURIS, 2001). Além das próprias coordenadas dos pontos que definem os segmentos de rodovia, outros dados podem ser gerados nos processos prévios de extração, tais como, larguras locais das rodovias associadas aos pontos dos segmentos de rodovia, largura média para cada segmento de rodovia, níveis de cinza locais associados aos pontos dos segmentos de rodovia, nível de cinza médio para cada segmento de rodovia etc.. As regiões de junção de rodovia são identificadas através da análise destes dados, segundo os critérios de proximidade e de homogeneidade radiométrica.

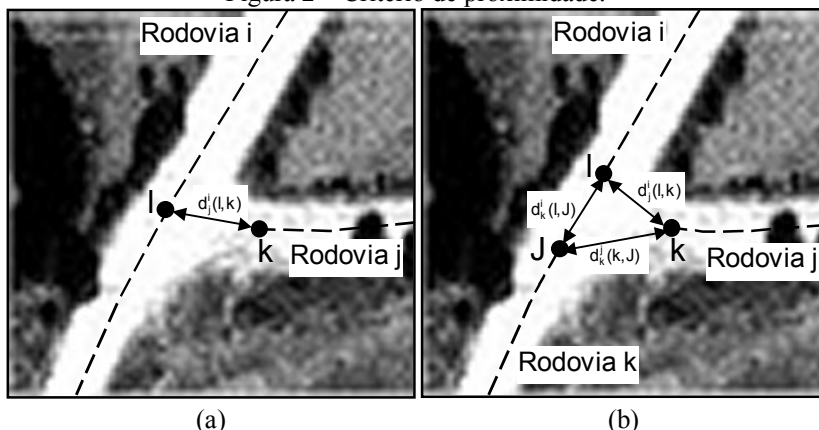
Pelo critério de proximidade, dois segmentos de rodovias são candidatos a concorrerem numa junção se a menor distância entre dois de seus respectivos pontos for menor que  $n$  vezes a largura média das rodovias previamente extraídas e envolvidas na análise. O critério de proximidade é então dado por (figura 2),

$$d_j^i(l, k) = \sqrt{(L_{(i,l)} - L_{(j,k)})^2 + (C_{(i,l)} - C_{(j,k)})^2} < n * w \quad (1)$$

onde,

- $d_j^i(l, k)$ : distância entre os pontos  $l$  e  $k$  pertencentes as rodovias  $i$  e  $j$ , respectivamente;
- $(L_{(i,l)}, C_{(i,l)})$ : ponto da rodovia  $i$  mais próximo da rodovia  $j$ ;
- $(L_{(j,k)}, C_{(j,k)})$ : ponto da rodovia  $j$  mais próximo da rodovia  $i$ ;
- $n$ : limiar para o critério de proximidade; e
- $w$ : largura média das rodovias previamente extraídas e envolvidas na análise.

Figura 2 – Critério de proximidade.



Como ilustração, a figura 2 mostra um caso em que duas configurações de junções de rodovia poderiam ser esperadas. A situação presente é, a princípio, desconhecida e dependente do julgamento do operador no momento do fornecimento dos pontos sementes para o algoritmo de extração dos segmentos de rodovia. A figura 2(a) mostra que o operador decidiu tratar a rodovia i como sendo apenas um segmento, o que certamente baseou-se na realidade presente e nas características do algoritmo de extração de rodovia empregado. Assim, tem-se dois segmentos de rodovia, rotulados como rodovia i e rodovia j. Nota-se que, o critério de proximidade é aplicado aos pontos  $K \in \text{rodovia j}$  e  $I \in \text{rodovia i}$ , sendo que este último necessita ser reamostrado geometricamente pelo critério de distância mínima, isto é, o ponto I é tal que  $d_l^i(l, k)$  seja mínima. Em vista do algoritmo empregado, o operador poderia julgar que o algoritmo de extração não seria capaz de transpor a junção entre ambas as rodovias e, conseqüentemente, a rodovia i seria dividida pelo operador em dois segmentos (figura 2(b)). Neste caso, como mostra a figura 2(b), o critério de proximidade reconheceria uma região de junção composta por três pontos extremos de segmentos de rodovia. Desta simples análise depreende-se que o problema de identificação das regiões de junção e dos respectivos pontos que as compõem, pelo presente critério, não é uma tarefa algorítmica tão simples. Além disso, podem haver situações em que uma verificação posterior é necessária, onde outros critérios devem ser empregados.

O critério de homogeneidade radiométrica fornece evidências adicionais sobre a validade das junções de rodovia pré-reconhecidas pelo critério de proximidade. Pelo critério de homogeneidade radiométrica, dois eixos de rodovias são candidatos a formarem uma junção se o nível de cinza médio ao longo da linha que une seus respectivos dois pontos mais próximos for aproximadamente igual ao nível de cinza

médio das rodovias previamente extraídas e envolvidas na análise. Os níveis de cinza são amostrados em intervalos pré-estabelecidos (normalmente de 1 *pixel*) através de algum método de interpolação (por exemplo, interpolação bilinear) a partir da imagem original. O critério de homogeneidade radiométrica para cada par (i e j) de segmentos de rodovia é dado pela seguinte regra (figura 3),

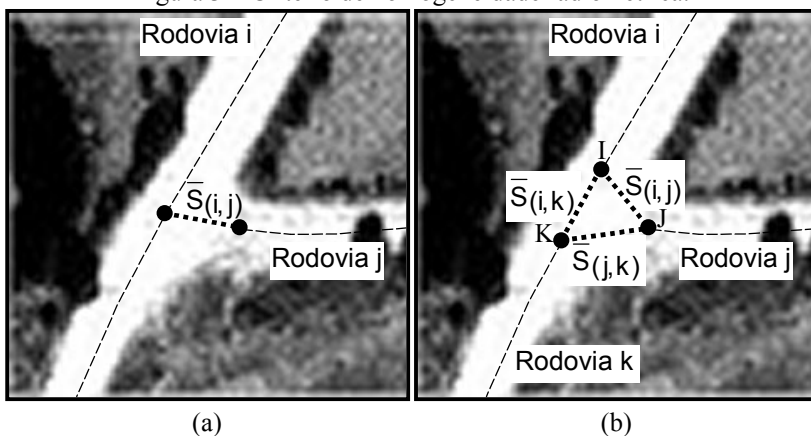
$$gqm_r - c_h < gqm_{l(i,j)} < gqm_r + c_h \quad (2)$$

$$gqm_{l(i,j)} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n G_p(L_p, C_p) \quad (3)$$

onde,

- $gqm_r$ : nível de cinza médio das rodovias previamente extraídas e envolvidas na análise;
- $gqm_{l(i,j)}$ : nível de cinza médio ao longo da linha que une os pontos mais próximos das rodovias i e j (por exemplo, segmento de reta  $\bar{S}_{(i,j)}$  na figura 3(a));
- n: número de pontos reamostrados ao longo de  $\bar{S}_{(i,j)}$ ;
- $G_p$ : nível de cinza reamostrado para a posição ( $L_p, C_p$ ) ao longo de  $\bar{S}_{(i,j)}$ ; e
- $c_h$ : limiar para o critério de homogeneidade radiométrica. O valor de  $c_h$  é geralmente tomado como sendo 10% de  $gqm_r$ .

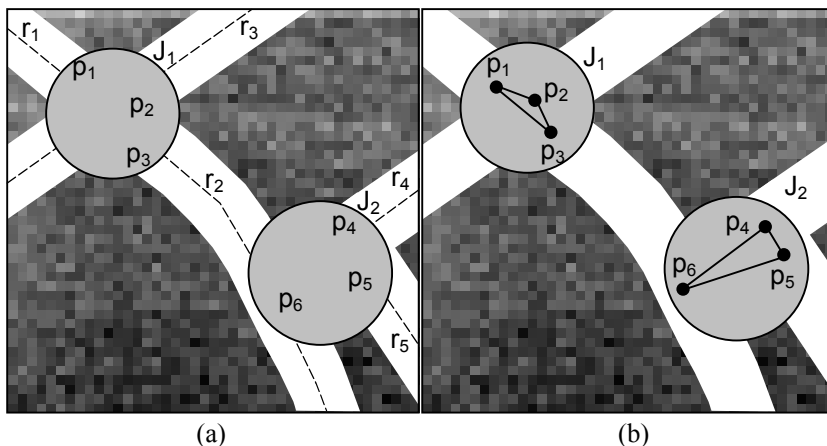
Figura 3 – Critério de homogeneidade radiométrica.



A figura 3 mostra o exemplo já discutido anteriormente por ocasião da análise do critério de proximidade (figura 2). Para este exemplo, é muito provável que o operador opte pelo fornecimento de pontos sementes que gerem os segmentos de rodovia mostrados na figura 3(a). Assim, a junção pré-detectada pelo critério de proximidade envolve o segmento de reta  $\bar{S}_{(i,j)}$ . Caso a situação mostrada na figura 3(b) estivesse presente, a região de junção a ser detectada envolveria o triângulo definido pelos pontos I, J e K. Para o primeiro caso (figura 3(a)), o critério de homogeneidade radiométrica é aplicado somente ao longo do segmento de reta  $\bar{S}_{(i,j)}$ . Noutro caso, figura 3(b), o critério de homogeneidade radiométrica é aplicado ao longo dos segmentos de reta ( $\bar{S}_{(i,j)}$ ,  $\bar{S}_{(i,k)}$  e  $\bar{S}_{(j,k)}$ ) definidos pelos pontos detectados pelo primeiro critério, que nesse caso são os pontos I, J e K.

Vale ressaltar que o algoritmo para a identificação de regiões de junção baseia-se nas duas etapas sequenciais descritas acima. Independentemente da complexidade das regiões de junção de rodovia presentes na imagem, na primeira etapa são detectados os pontos que têm potencial para constituírem junções de rodovia, sendo que a regra de decisão baseia-se no critério de proximidade. Na segunda etapa, o algoritmo usa o critério de homogeneidade radiométrica para verificar e corrigir possíveis enganos cometidos na etapa inicial. A figura 4(a) mostra um exemplo ilustrativo adicional, onde um ponto falso de junção de rodovia é detectado. Os segmentos de rodovia previamente extraídos são representados por  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  e  $r_5$ . Neste exemplo, duas regiões potenciais de junção de rodovia ( $J_1$  e  $J_2$ ) são detectadas. A região  $J_1$  é composta dos pontos extremos  $p_1 \in r_1$  e  $p_3 \in r_2$  e um ponto intermediário  $p_2 \in r_3$ . Já a região  $J_2$  é composta de dois pontos extremos  $p_4 \in r_4$  e  $p_5 \in r_5$  e um ponto intermediário  $p_6 \in r_2$ . Cabe ressaltar que uma simples inspeção visual sobre a figura 4(a) mostra que este último ponto não está correto.

Figura 4 – Determinação de regiões potenciais de junção. (a) Critério de proximidade; e (b) Critério de homogeneidade radiométrica.



Conforme pode ser visto na figura 4(b), o critério de homogeneidade radiométrica é aplicado ao longo dos segmentos de reta unindo os pontos das regiões de junção detectados anteriormente. Como os segmentos  $\overline{p_1p_2}$ ,  $\overline{p_1p_3}$  e  $\overline{p_2p_3}$  encontram-se sobre o leito da rodovia, os tons de cinza médios ao longo desses segmentos, dados pela equação 3, não diferem significativamente do tom de cinza médio dos segmentos de rodovia envolvidos na região de junção  $J_1$ . Consequentemente, todos os pontos de  $J_1$  são confirmados pelo critério de homogeneidade radiométrica. Já em relação à região de junção  $J_2$ , os tons de cinza médios para os segmentos  $\overline{p_4p_6}$  e  $\overline{p_5p_6}$  devem ser significativamente inferiores ao tom de cinza médio dos segmentos de rodovia  $r_2$ ,  $r_4$  e  $r_5$ . Dessa forma, o ponto  $p_6$  deve ser eliminado da região de junção  $J_2$ , permanecendo apenas os pontos  $p_4$  e  $p_5$ .

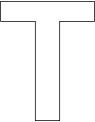
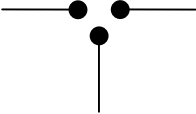
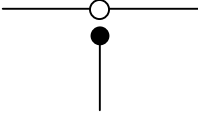
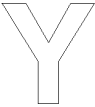
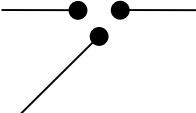
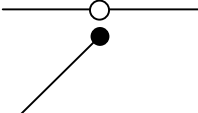

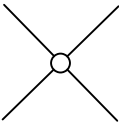
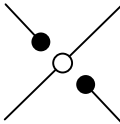
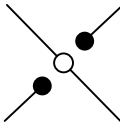
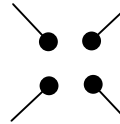

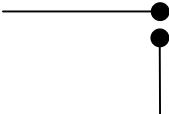
A metodologia descrita acima apenas permite detectar que numa determinada região existe uma junção de rodovia. Permite também identificar quais os pontos e os segmentos de rodovia que estão envolvidos na junção detectada. Entretanto, a reconstrução completa das junções pré-detectadas necessita da identificação dos pontos (de junção) que melhor representam os centros geométricos das respectivas junções. Além disso, os segmentos envolvidos nas junções de rodovia devem ser conectados aos respectivos pontos de junção. Uma solução para este problema, baseada em modelos de junção de rodovia, é apresentada na próxima seção.

## 2.2 RECONSTRUÇÃO DA MALHA VIÁRIA USANDO MODELOS DE JUNÇÃO DE RODOVIA

A reconstrução das junções de rodovia baseia-se nos modelos de junção de rodovia que melhor se adaptam com as regiões de junção previamente detectadas. Como poderá ser verificado mais adiante, o algoritmo de reconstrução de junções de rodovia depende fundamentalmente da forma que os segmentos de rodovia se relacionam entre si nas respectivas regiões de junção.

Primeiramente, as regiões de junção previamente detectadas são classificadas de acordo com os possíveis modelos de junção de rodovia (figura 5). As possibilidades apresentadas para cada modelo de junção dependem de como as rodovias são extraídas nas regiões de junção, o que por sua vez depende principalmente do julgamento do operador no momento da seleção dos pontos sementes. Por exemplo, a junção em T pode ser formada por dois ou três segmentos de rodovias.

Figura 5 – Classificação de regiões de junção.

MODELOS DE JUNÇÃO				
Tipo de Junção	Ocorrências e Pontos Envolvidos			
				
				
				
				

Como apresentado na figura 5, as junções dos tipos T e Y apresentam as mesmas características com relação às ocorrências e aos pontos envolvidos – i.e., se são pontos intermediários (circunferências na figura 5) ou extremos (círculos pretos na figura 5) dos segmentos de rodovia. A distinção entre ambas as ocorrências é feita pela verificação de ângulos entre os segmentos de rodovia envolvidos nas respectivas regiões de junção. A figura 5 mostra ainda que são previstas quatro junções do tipo X e um do tipo L. As junções do tipo X são compatíveis com as várias possibilidades de inicialização do processo prévio de extração de segmentos de rodovia.

O ângulo entre dois segmentos de rodovia, elemento chave na identificação dos vários tipos de junção, é definido como sendo o ângulo entre os vetores direção dos segmentos de rodovia nos pontos de junção envolvidos. Cada vetor direção de segmento de rodovia é definido através do ponto da região de junção considerada e

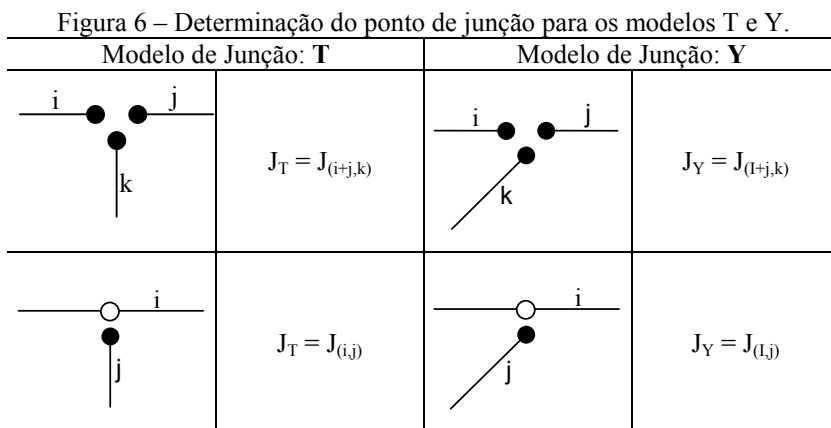
seu vizinho mais próximo. Por exemplo, no caso de pontos extremos, os vetores direção são obtidos através dos dois primeiros ou dos dois últimos pontos dos segmentos de rodovia. Sendo  $\vec{V}_i = (c_1 \ c_2)$  e  $\vec{V}_j = (c'_1 \ c'_2)$  os dois vetores direção correspondentes às rodovias  $i$  e  $j$ , definidos em dois pontos classificados como pontos de região de junção, o ângulo entre os eixos considerados é dado por:

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{c_1 c'_1 + c_2 c'_2}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2} \sqrt{c'^2_1 + c'^2_2}} \right], \text{ com } 0 \leq \alpha \leq 180 \quad (4)$$

O ponto de junção entre os eixos de rodovias  $i$  e  $j$  é dado pela intersecção entre as retas definidas pelos pontos classificados como pertencentes às regiões de junção e os respectivos vizinhos mais próximos. Sendo  $a_i x - y + b_i = 0$  e  $a_j x - y + b_j = 0$  as respectivas equações da reta referentes às rodovias  $i$  e  $j$ , então a intersecção ( $J_{(i,j)}$ ) entre ambas as rodovias é dada por:

$$J_{(i,j)} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_i & -1 \\ a_j & -1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

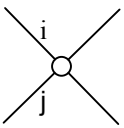
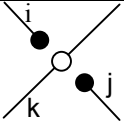

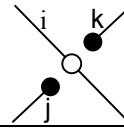
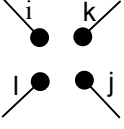
Os pontos de junção para os modelos T ( $J_T$ ) e Y ( $J_Y$ ) são obtidos, para várias possibilidades, conforme mostra a figura 6.



Nas expressões  $J_T = J_{(i+j,k)}$  e  $J_Y = J_{(i+j,k)}$ , “i+j” significa fusão entre as rodovias i e j. Isso mostra a importância de saber *a priori* qual o modelo de junção que melhor se adapta a uma determinada região de junção de rodovia pré-detectada. Por exemplo,  $J_T = J_{(i+j,k)}$  informa que primeiro os segmentos de rodovia i e j devem ser fundidos e, após, o ponto de junção deve ser calculado como a interseção (eq. 5) do resultado da fusão (“i+j”) e o segmento de rodovia k. A interseção entre os segmentos de rodovia i e j é numericamente instável (isto porque ambos os segmentos são aproximadamente colineares), motivo pelo qual a fusão *a priori* é necessária.

A figura 7 mostra, para as várias possibilidades, como os pontos de junção para os modelos X ( $J_X$ ) e L ( $J_L$ ) são obtidos.

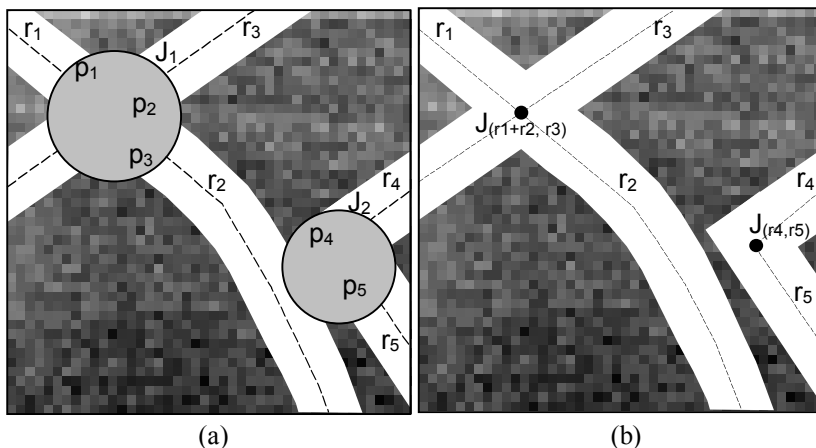
Figura 7 – Determinação do ponto de junção para os modelos X e L.

Modelo de Junção: X		Modelo de Junção: L	
	$J_X = J_{(i,j)}$		
	$J_X = J_{(i+j,k)}$		$J_L = J_{(i,j)}$
ou			
	$J_X = J_{(i,j+k)}$		
	$J_X = J_{(i+j,k+l)}$		

Nas expressões  $J_X = J_{(i+j,k)}$ ,  $J_X = J_{(i,j+k)}$  e  $J_X = J_{(i+j,k+l)}$ , “i+j”, “j+k” e “k+l” significam, respectivamente, fusão entre i e j, j e k, e k e l. Como exemplo,  $J_X = J_{(i+j,k+l)}$  indica que o ponto de junção é determinado através da intersecção (eq. 5) entre “i+j” e “k+l”. Noutro exemplo,  $J_X = J_{(i,j)}$  indica que o ponto de junção é determinado diretamente pela intersecção dos segmentos de rodovia i e j. Analogamente,  $J_L = J_{(i,j)}$  significa que o ponto de junção é determinado pela intersecção entre as rodovias i e j.

Um exemplo ilustrativo é mostrado na figura 8. Este exemplo foi discutido por ocasião da detecção das regiões de junção de rodovia (figuras 4(a) e 4(b)). As regiões de junção de rodovia pré-detectadas são rerepresentadas na figura 8(a). A figura 8(b) mostra que as duas regiões de junção de rodovia foram reconstruídas através dos modelos de junção “X” e “L”, com base nas regras  $J_{(r1+r2, r3)}$  e  $J_{(r4, r5)}$ .

Figura 8 – Exemplo ilustrativo de reconstrução da malha viária. (a) Regiões de junção detectadas; e (b) Extensão dos eixos de rodovias aos pontos de junção determinados.



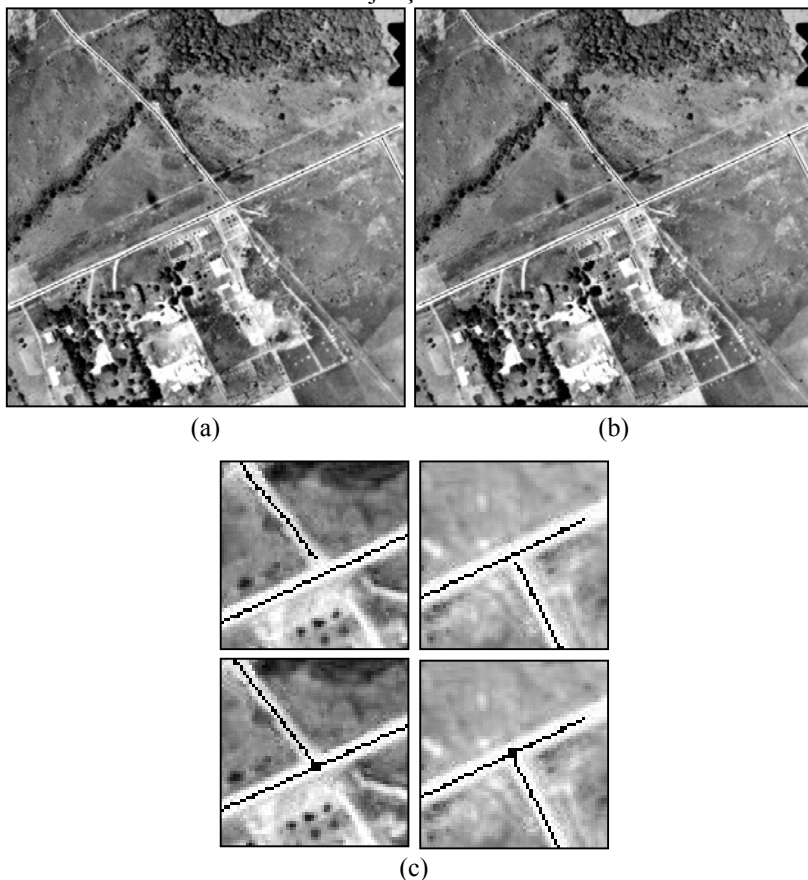
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método descrito foi implementado em linguagem Borland C++ Builder 4.0 para ambiente PC – Windows. Para avaliar o desempenho do método foram realizados experimentos a partir dos resultados gerados (por exemplo, o eixo de rodovia extraído, a largura média e o nível de cinza médio das rodovias) pelo método semi-automático de extração de rodovia proposto em DAL POZ e SILVA (2002a, b). As imagens aéreas utilizadas (figuras 9, 10 e 11) são de média resolução. No contexto de metodologias de extração de rodovia, as imagens são consideradas de média resolução quando seus *pixels* variam entre 0,7 m e 2,0 m, sendo que geralmente as rodovias presentes nessas imagens possuem larguras médias variando entre 3 e 6 *pixels* (BAUMGARTNER et al., 1999). As imagens foram obtidas junto à *home page* do Sistema *BADGER* (BADGER, 2000).

O primeiro experimento foi realizado com a imagem real – 1 (figura 9(a)). Como pode ser notado, esta imagem é formada por três rodovias principais, as quais foram devidamente extraídas pelo modelo de extração proposto em DAL POZ e SILVA (2002a, b). Duas junções de rodovia do tipo “T” foram detectadas e reconstruídas pelo algoritmo de reconstrução da malha viária. Estes resultados são

apresentados na figura 9(b) e, mais detalhadamente, na figura 9(c). Nesta última figura, ambas as sub-imagens superiores mostram as respectivas regiões de junção ampliadas e, as correspondentes inferiores, as respectivas junções detectadas e reconstruídas. Notar que os pontos das junções reconstruídas encontram-se em posições bem acuradas quando comparadas com as que seriam obtidas usando-se a visão natural. De fato, uma comparação numérica entre as posições dos pontos de junção determinadas via algoritmo computacional e as correspondentes posições determinadas visualmente, revela que as discrepâncias estão na casa de 1 *pixel*.

Figura 9 – Resultados obtidos com a imagem real – 1. (a) Resultados obtidos pelo método de extração; (b) Malha viária reconstruída; e (c) Ampliação da área de junção.



A figura 10 apresenta os resultados obtidos para imagem real – 2. Os segmentos de rodovia previamente extraídos pelo método de extração são apresentados na figura 10(a). A malha viária reconstruída é apresentada na figura 10(b). Já a região de junção detectada e reconstruída pode ser vista, em destaque, na figura 10(c). Verifica-se que uma junção do tipo “X” foi corretamente detectada e reconstruída pelo algoritmo. De fato, notar que o ponto da junção de rodovia reconstruída encontra-se acuradamente posicionado. A exemplo do experimento anterior, a distância entre os pontos de junção reconstruídos computacional e manualmente encontram-se compatíveis com o nível do *pixel*. A figura 10(b) mostra também que a malha viária encontra-se também reconstruída corretamente segundo o ponto de vista topológico.

Figura 10 – Resultados obtidos com a imagem real – 2. (a) Resultados obtidos pelo método de extração; (b) Malha viária reconstruída; e (c) Ampliação da área de junção.

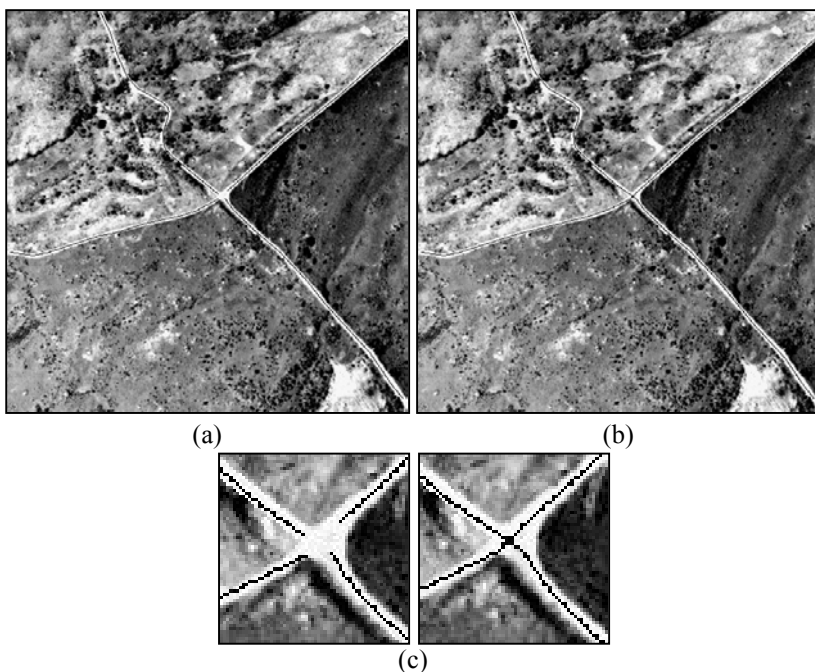
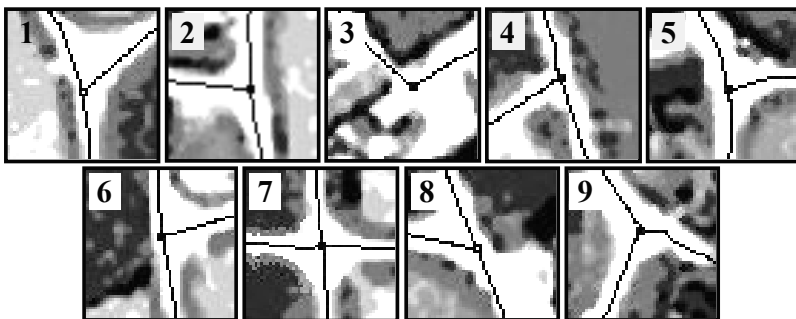


Figura 11 – Resultados obtidos com a imagem real – 3. (a) Resultados obtidos; e (b) Janelas mostrando em destaque as junções 1, 2, ..., 9.



(a)



(b)

O terceiro experimento foi realizado com a imagem real – 3 (figura 11). Como pode ser notado, esta imagem é composta de 10 rodovias gerando diferentes tipos de junção. Embora a presença de irregularidades geométricas (locais onde a rodovia é formada por uma ou nenhuma borda) e obstruções, os resultados obtidos pelo modelo de extração são bastante satisfatórios. Nota-se ainda, a presença de nove junções, sendo 5 do tipo “Y”, 2 do tipo “T”, 1 do tipo “L” e 1 do tipo “X”. A figura 11(a) apresenta uma visão global dos resultados obtidos. Já a figura 11(b) mostra em destaque as junções detectadas e reconstruídas. Notar a excelente qualidade dos resultados, os quais se mostram bastantes compatíveis com os que seriam obtidos manualmente. Isso é confirmado numericamente, uma vez que se obteve discrepância média em torno de 1 *pixel* quando comparados os pontos de junção reconstruídos computacional e visualmente.

#### 4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho apresentou uma metodologia automática para a detecção e a reconstrução de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. O objetivo principal dessa metodologia é a complementação automática dos resultados gerados por métodos semi-automáticos de extração de rodovia que, geralmente, possibilitam a extração acurada e confiável de segmentos de rodovia ligando regiões de junção. Isto é, ao algoritmo proposto fica a tarefa de detectar e de reconstruir automaticamente as junções de rodovia. Já ao operador fica a responsabilidade apenas de posicionar os pontos sementes nas proximidades das regiões de junção e, às vezes, em algumas regiões críticas situadas ao longo dos segmentos de rodovia selecionados para extração.

O método desenvolvido foi avaliado experimentalmente usando três imagens aéreas de média resolução. Como visto, as imagens possibilitaram testar a metodologia com as mais freqüentes ocorrências de junção de rodovia em imagens de cenas rurais, isto é, junções em “T”, “L”, “Y” e “X”. O método provou ser eficiente em todos os casos presentes nas imagens de teste. Isto é, tanto a topologia das junções reconstruídas quanto o ponto representativo das junções de rodovia provaram ser bastante compatíveis com o que seria obtido visualmente. Portanto, os resultados experimentais comprovaram que, desde que o operador tome os cuidados mínimos, estabelecidos anteriormente, na inicialização do processo prévio de extração de segmento, o método proposto é uma ferramenta útil para a complementação da malha viária como um processo posterior à extração de segmentos de rodovia.

Para trabalhos futuros, pode-se mencionar a extensão da metodologia para tratar imagens com conteúdos mais complexos envolvendo cenas suburbanas e rurais. Neste caso, formas mais complexas de junções de rodovia têm que ser previstas, como, por exemplo, junções de rodovia envolvendo viadutos e acessos através de alças laterais.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil) - Processos no. 1998/15553-3 e 00/12651-6 e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) - Processo no. 45.1078/00-4. A FAPESP continua apoiando o projeto através do processo no. 2001/01168-5.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A. Uncertainly in image-based change detection. In: **Accuracy 2000**, Amsterdam, Proceedings, p. 1-8, 2000.
- BADGER. **Sistema para distribuição via Internet de mapas e imagens da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA**. Disponível em: <http://badger.parl.com>. Acesso em: 10/01/2000.
- BARSI, A.; HEIPKE, C.; WILLRICH F. Junction extraction by artificial neural network system – JEANS. In: **ISPRS – Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision**, Graz, Áustria, Proceedings, 2002.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H., Automatic road extraction in rural areas. In: **International Archives Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXII, Part 3-2W5, p. 107-112, 1999.
- BOICHIS, N.; COCQUEREZ, J. P.; AIRAULT, S. A top down strategy for simple crossroads extraction. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXII, part 2/1, p. 19–26. 1998.
- BOICHIS, N.; VIGLINO, J. M.; COCQUEREZ, J. P. Knowledge based system for the automatic extraction of road intersections from aerial images. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, Supplement, part 3, p. 27–34. 2000.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias de imagens digitais, **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro 53, p. 65-72, 2001.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Active testing and edge analysis for road centreline extraction. In.: **ISPRS – Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision**, Graz, Austria, Proceedings, p. 44-47, 2002a.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Delineamento de rodovias usando os princípios de teste ativo e de bordas anti-paralelas. In.: **Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente**, p. 194-205, CD – ROM, 2002b.

- GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 63 (8), p. 985-995, 1997.
- KASS, M; WITKIN, A; TERZOPOULOS, D. Snakes: Active Contour Models. In: **Proceeding of 1<sup>st</sup> International Conference on Computer Vision**, London, p. 259-268, 1987.
- MCKEOWN, D. M., DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: **Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 662- 672, 1988.
- MERLET, N.; ZERUBIA, J. New prospects in line detection by dynamic programming. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence** 18 (4), p. 426- 431, 1996.
- NEUENSCHWADER, W. M.; FUA, P.; IVERSON, L.; SZEKELY, G.; KUBLER, O. Ziplock snakes. **International Journal of Computer Vision** 25(6), p. 191-201, 1997.
- SILVA, M. A. O. **Extração semi-automática de rodovias combinando o princípio de bordas anti-paralelas com um novo modelo de correlação da superfície intensidade**. Relatório de Pesquisa de Iniciação Científica – FAPESP, 146 p., 2001.
- SILVA, M. A. O. **Extração semi-automática de rodovias combinando o princípio de bordas anti-paralelas com um novo modelo de correlação da superfície intensidade**. Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica – FAPESP, 166 p., 2002.
- TEOH, C.; SOWMYA, A. Junction Extraction from high resolution images by composite learning. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. XXXIII, part B3, pp. 882 – 888, 2000.
- VOSSELMAN, G.; de KNECHT, J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images**, Birkhaeuser Verlag, p. 265-274, 1995.
- WANG, Y.; TRINDER, J. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. In: **ASPRS 2000 Annual Conference**, Washington, D.C., Proceedings, 2000.

(Recebido em abril/03. Aceito em outubro/03)