colloquium exactarum

UTILIZAÇÃO DE DADOS LASER E IMAGENS AÉREAS PARA A EXTRAÇÃO DE VIAS URBANAS

URBAN ROADS EXTRACTION USING LASER DATA AND AERIAL IMAGES

Anderson Akio Gohara[1]; Mário Augusto Pazoti[1]; Francisco Assis da Silva[1]; Danillo Roberto Pereira[1]; Almir Olivette Artero[2]; Marco Antonio Piteri[2]

[1]Faculdade de Informática – FIPP, Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE
e-mail: anderson_gohara@hotmail.com, {mario, chico, danilopereira}@unoeste.br
[2]Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Universidade Estadual Paulista – Unesp
e-mail: {almir, piteri}@fct.unesp.br

RESUMO – A extração automática de feições a partir de imagens aéreas digitais não é uma solução trivial, devido a problemas de oclusões, sombras e pontos de vista diferentes. Para aprimorar o processo de extração foram utilizados dados lasers, os quais possuem informações complementares como altura e tipo de material dos objetos sobre a superfície. Neste trabalho foi realizada a combinação de imagem digital e de dados lasers a fim de melhorar os resultados da extração automática de vias urbanas. As vias urbanas foram detectadas a partir das informações de retorno do laser. Em seguida foram aplicadas duas estratégias para conectar as vias desconexas, sendo a primeira baseada na angulação dos segmentos candidatos e a segunda por meio da análise das regiões arborizadas na imagem digital. Os resultados apresentaram uma taxa de sensibilidade superior a 92% e valor preditivo positivo superior a 67%.
Palavras-chave: Extração de Feições; Vias Urbanas; Dados Lasers.

ABSTRACT – The automatic feature extraction from digital aerial images is not a trivial solution due to occlusion problems, shadows and different viewpoints. To improve the extraction process we used laser data, which have additional information such as height and material type of objects on the surface. In this paper we performed the combination of digital image and laser data in order to improve the results of automatic extraction of urban roads. Urban roads were detected from the response of laser information. Then we applied two strategies to connect the disconnected road segments. The first one is based on the similarity of segment angle; the second one is performed by analysis of the wooded regions in the digital image. The results showed a higher sensitivity rate of 92% and positive predictive value greater than 67%.
Keywords: Feature Extraction; Urban Roads; Laser Data.

Recebido em: 10/04/2015
Revisado em: 03/05/2015
Aprovado em: 28/06/2015

1 INTRODUÇÃO

A extração de feições é um tema que tem recebido considerável atenção nos últimos tempos. A extração da malha viária rural é um tópico amplamente pesquisado, no entanto a extração da malha viária de regiões urbanas densas é uma tarefa muito difícil, de forma que são poucos os trabalhos relacionados. Os fatores que tornam esse problema complexo são a heterogeneidade dos objetos presentes na cena e o contexto, ou seja, as relações existentes entre vias e outros objetos (prédios, árvores, carros, etc.). Esta complexidade é também inerente à extração de outras feições urbanas, como os contornos de telhados. Esses argumentos mostraram que desconsiderar o contexto na extração de objetos urbanos pode levar a obstáculos difíceis de serem ultrapassados (GALVANIN, 2007).

A extração de feições cartográficas pode ser dividida em duas subtarefas, o reconhecimento e o delineamento. Os métodos automáticos realizam ambas as tarefas, enquanto os métodos semiautomáticos não realizam o reconhecimento. Embora os métodos semiautomáticos dependam do auxílio de um operador, eles realizam toda a tarefa de delineamento do traçado das feições, que normalmente é demorado e cansativo (DAL POZ et al., 2007).

Imagens de alta resolução oferecem informação espacial detalhada da superfície terrestre de forma que feições urbanas sejam representadas por vários pixels e são usados em muitos métodos de extração. No entanto, essa informação é insuficiente para a classificação da cobertura do solo urbano. As oclusões existentes causam perda de informação espectral em algumas imagens (ARAKI, 2005). A classificação por pontos apenas considerando a altura também não é suficiente para identificar objetos como prédios, pois existem objetos com altura igual ou superior (CENTENO; MITISHITA, 2007). Estes problemas podem ser solucionados com a utilização de dados lasers que contêm informação altimétrica da superfície, juntamente a imagens digitais que contêm informação cromática, melhorando a discriminação das regiões. Um ponto importante é que para a fusão de dados de fontes diferentes como bases cartográficas, dados altimétricos e imagens, é necessário que a referência espacial seja comum (ARAKI, 2005).

Deste modo, este trabalho apresenta um algoritmo que utiliza os dados de imagens digitais e dados lasers para a extração automática de vias urbanas. Com isso, espera-se facilitar a extração de vias urbanas que muitas vezes é feita de forma manual pelos profissionais da área da cartografia.

O presente artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 é detalhado o funcionamento da tecnologia de varredura a laser. Na Seção 3 são apresentados os trabalhos relacionados à extração de vias, sem e com a utilização de dados laser. Na Seção 4 é detalhada a metodologia utilizada em cada etapa da extração de vias urbanas. A seção 5 contém a análise dos dados obtidos. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as considerações finais e proposta de trabalhos futuros.

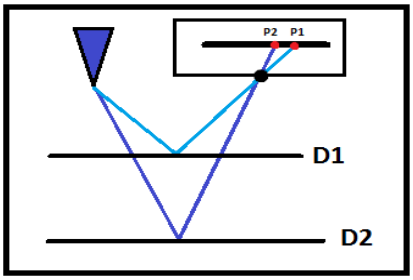
2 TECNOLOGIA DE VARREDURA A LASER

Atualmente o mercado e as pesquisas buscam tecnologias que possibilitem uma maior velocidade e acurácia na obtenção de resultados. Uma dessas tecnologias que vem sendo utilizada em fotogrametria[1] baseia-se nos dados provenientes do sistema de varredura a laser, que podem ser estáticos ou dinâmicos. O mapeamento da superfície por um sistema de varredura estático é feito a partir de um ponto fixo, enquanto que o sistema dinâmico é feito a partir de uma plataforma móvel (WUTKE, 2006).

O sistema de varredura laser denominado de Lidar (*Light Detection and Ranging*) ou Ladar (*Laser Detection and Ranging*) é uma tecnologia projetada para medição de coordenadas tridimensionais de pontos em uma superfície. Este sistema baseia-se na emissão de um pulso laser (CENTENO; MITISHITA, 2007).

O funcionamento básico do sistema de varredura a laser consiste em emitir um pulso laser em direção a uma superfície alvo, captando a reflexão sobre o objeto atingido. Este processo é classificado em dois princípios: triangulação e *"time-of-light"* (CENTENO; MITISHITA, 2007).

Os sistemas que funcionam com o princípio da triangulação utilizam um emissor laser e uma câmara para captar os dados lasers. De acordo com a distância entre o objeto e o sensor, o pulso laser aparece em pontos diferentes no plano da imagem da câmara. Um triângulo é formado pelo emissor, a câmara e o ponto na superfície (CENTENO; MITISHITA, 2007). A partir dessa triangulação pode-se calcular a distância entre o sistema de varredura e o objeto. Na Figura 1 é exemplificado um caso em que dois pulsos laser, por atingirem objetos de distâncias diferentes, incidem em posições diferentes no plano de imagem da câmara.



[1] Consiste na obtenção de informações confiáveis sobre objetos e do meio ambiente por meio de processos do registro, medição e interpretação das imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética registrados (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1966).

Figura 1. Triangulação realizada pelo sistema laser para diferentes distâncias.

Os sistemas que funcionam segundo o princípio de *time-of-light* baseiam-se no tempo decorrido entre a emissão do pulso laser e o seu retorno para calcular a distância do objeto. Na Equação 1 é mostrado o mostrado o cálculo da dessa distância:

$$R = c * dt / 2 \quad (1)$$

em que *R* é a distância do objeto em relação ao sistema de varredura, *c* é a velocidade de propagação do raio laser e *dt* é o tempo transcorrido entre a emissão e a capação do pulso laser.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem na literatura diversas técnicas, metodologias e algoritmos relacionados à extração de rodovias em imagens aéreas e orbitais, com e sem a utilização de dados lasers. Na sequência são relacionados alguns métodos que não utilizam dados lasers.

No trabalho de Silva (2003), o autor apresentou uma metodologia para a detecção e a reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. O método apresentado pelo autor requer que os segmentos de rodovia ligando as regiões de junção sejam previamente extraídos por meio de uma metodologia semiautomática. O método usado se baseia praticamente em duas etapas sendo:

1. 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 da rodovia. Os pontos dos agrupamentos que satisfizerem esse critério são aceitos como pertencentes às junções de rodovia.

2. 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 da junção de rodovia consiste no cálculo do ponto mais representativo do centro geométrico da região de junção e no estabelecimento das conexões entre esse ponto e os pontos da região de junção detectados na etapa anterior do método.

Mendes et al. (2004) apresentam um método para o delineamento de estradas vicinais em imagens digitais, baseando-se em uma combinação entre uma técnica de

extrapolação linear e um delineador de rodovia baseado em técnicas de correlação. Um ponto do eixo de rodovia, previamente extraído, é linearmente extrapolado, resultando numa posição aproximada. Esta posição é corrigida pelo delineador de rodovia baseado na correlação entre perfis de tons de cinza, extraídos transversalmente ao eixo da rodovia. Essa estratégia é então repetida até que todo o eixo da rodovia em consideração seja delineado. O processo de extração é interrompido se a porcentagem de falhas na correção das posições extrapoladas, em um segmento predefinido de rodovia, for maior que um dado limiar.

No trabalho de Alves (2007) é avaliada a extração semiautomática de rodovias sobre o extrato de uma imagem híbrida, visando à aplicação na atualização cartográfica. Os resultados obtidos com o uso do algoritmo baseado em programação dinâmica (ERGeo) foram comparados com os resultados da fotointerpretação e com o levantamento em campo (tomado como referência). Para isso, foi utilizada uma área rural de uma base cartográfica 1:50.000 da cidade Silva Jardim/RJ. As cenas (imagens) obtidas pelos satélites CBERS e SPOT foram combinados através da fusão por componentes principais e foram realizados processamentos de imagens para aumentar o contraste e realçar as feições rodoviárias.

Outros trabalhos relacionados são referentes à fusão de informações de diferentes tipos.

Araki (2005) apresenta um método para fusão de dados de informações espectrais, altimétricas e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução. A informação espectral presente nas imagens de alta resolução, apesar de representarem a superfície terrestre de forma detalhada, são insuficientes para a classificação da cobertura do solo urbano. Isso ocorre devido a perda de informação pela oclusão. Este problema pode ser contornado com a utilização de dados altimétricos adquiridos pelos sistemas laser aerotransportados, melhorando a discriminação. Outra possibilidade é a utilização de informações auxiliares existentes em bases cartográficas para auxiliar a discriminação entre as classes. Um ponto importante para a fusão de dados dessas diferentes fontes é a necessidade de que possuam uma referência espacial comum. O método para a classificação deve lidar com dados correspondentes às escalas de medidas numéricas e nominais, e não depender da atribuição de uma determinada distribuição estatística para as classes. As árvores de decisão constituem uma alternativa para a classificação supervisionada, sendo que também possibilitam a explicitação do conhecimento. Por sua vez, o conhecimento explicitado por

algoritmos de indução de árvores de decisão pode ser representado na forma de regras que formam a base de conhecimento desse sistema.

Há também trabalhos já realizados que utilizam dados lasers para a extração de estradas.

Castro (2009) apresenta uma metodologia de extração de estradas a partir de imagens de intensidade laser utilizando morfologia matemática[2]. As estradas são feições existentes em mapeamentos, que podem ser destacadas pelo seu dinamismo em função de modificações em sua forma ou textura, tipo (pavimentada ou não pavimentada) e/ou inclusão de novas estradas ou trechos no sistema viário. O primeiro passo consiste em gerar um MDT (Modelo Digital de Terreno) a partir dos dados da altura. Na sequência as estradas são classificadas de acordo com a amplitude esperada para a intensidade do pulso laser e para as diferenças de altura numa vizinhança.

Hu et al. (2004), por sua vez, combinam dados laser e imagens aéreas. O reconhecimento das estradas a partir das imagens aéreas pode ser complementado utilizando os dados lasers na detecção de áreas sombreadas não capturadas pela imagem, facilitando a extração.

4 ALGORITMO PARA A EXTRAÇÃO DE VIAS URBANAS

Neste trabalho são aplicadas técnicas de visão computacional para a extração de vias urbanas utilizando como entrada dados lasers e imagens aéreas digitais. Um recurso utilizado em uma das etapas deste trabalho é o MDT, resultado do trabalho de Cardoso, Silva e Pazoti (2014). O MDT consiste em um mapeamento 3D do terreno, excluindo-se todos os objetos de sua superfície como casas, prédios, carros, entre outros. O MDT foi gerado a partir filtragens aplicadas no Modelo Digital de Elevação (MDE[3]).

4.1 Etapas

Este trabalho foi executado segundo as etapas mostradas no fluxograma da Figura 2.

4.1.1 *Matching* entre dados laser e imagem digital

As diferenças de escala, densidade e angulação fazem com que não haja uma correspondência direta entre um ponto na matriz do MDE e um ponto na mesma posição na Imagem. Isso se deve a nenhum tratamento prévio ter sido realizado nos dados laser ou imagens com esse propósito. Como o objetivo deste trabalho é a utilização tanto de informações de cores como de

[2] Extração de informações relativas à geometria e à topologia de conjuntos desconhecidos de uma imagem a partir do elemento estruturante (FACON, 2011).

[3] O conjunto de pontos tridimensionais gerados pelo processo de escaneamento a laser da superfície. Esse conjunto inclui pontos de objetos como construções, carros, árvores, etc (CARDOSO et al., 2014).

altitude e material, torna-se necessário realizar o *matching* (correspondência) entre esses dados.

O *matching* entre as imagens de alta resolução e os dados laser foi feito por meio da seleção manual de pontos comuns entre a imagem digital e a imagem em escala de cinza gerada a partir dos dados laser, conforme ilustrado na Figura 3.

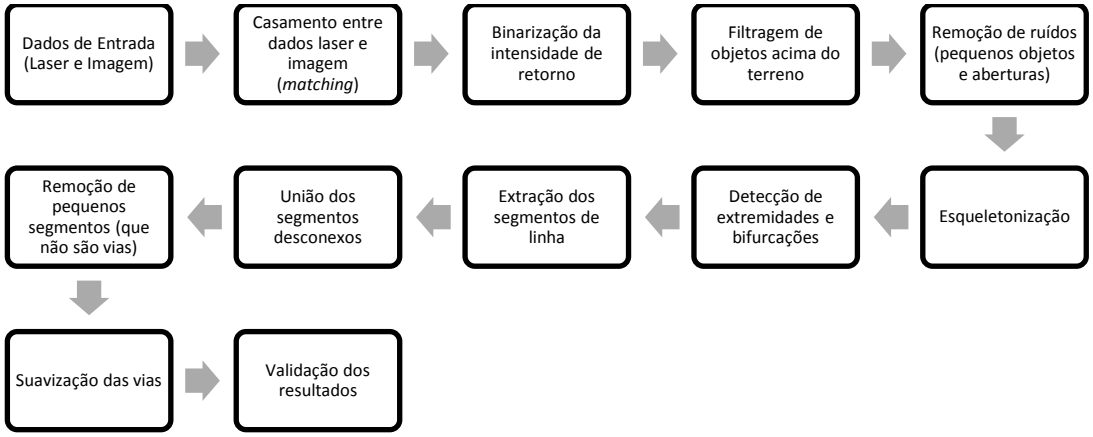


Figura 2. Fluxograma do processo de extração de vias urbanas.

Após definido o conjunto de pontos, calcula-se a matriz de transformação. Essa matriz é formada pelo acúmulo de duas matrizes de transformação geométricas: escala e rotação. A matriz de escala é calculada pela distância entre os pontos selecionados, enquanto a matriz de rotação é calculada pelo ângulo entre os vetores formados pelos pontos. A composição da matriz é representada na Equação 2 (linear) e Equação 3 (matricial). O próximo passo consiste na associação de cada ponto da imagem de alta resolução com seu respectivo ponto no MDE e vice-versa.

$$M = R(\theta).S_{xy} \qquad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

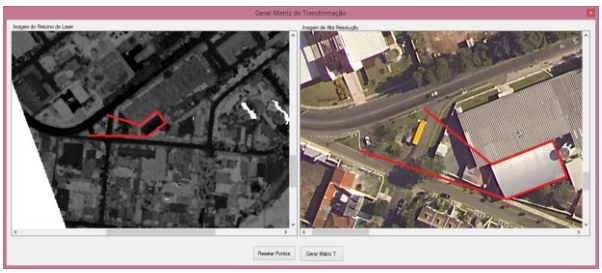


Figura 3. Seleção de pontos em comum entre a imagem gerada a partir dos dados laser (à esquerda) e a imagem de alta resolução (à direita) para realização do *matching*.

Em razão da diferença de resolução entre as duas fontes de dados, fez-se necessário realizar um ajuste no mapeamento da imagem digital para o MDE. Desse modo garantiu-se que todo pixel na imagem digital seja mapeado ao ponto correspondente nos dados laser, exceto

casos em que não exista o ponto correspondente.

4.1.2 Filtragem dos dados laser

Os dados lasers podem ser divididos em dois tipos de informação, as informações altimétricas que representam a altura do objeto e as informações de intensidade de retorno que representam o material do objeto. Ambas as informações foram utilizadas para a extração de vias neste trabalho.

Inicialmente foi gerada uma imagem binarizada a partir dos dados de intensidade de retorno, onde os pontos mais escuros representam baixo retorno e os pontos mais claros representam alto retorno, conforme mostrado na Figura 4.



Figura 4. Imagem gerada a partir das informações de retorno dos dados laser.

Visto que o asfalto é um material de retorno muito baixo, conforme mostrado na Tabela 1, realizou-se a remoção de todos os pontos em que o retorno possui valor acima desse limiar. O resultado dessa etapa é mostrado na Figura 5.

É possível perceber que grande parte das vias foi mantida na imagem binarizada, no entanto, há ainda muito ruído. Para reduzir os ruídos foram aplicadas as seguintes filtragens: remoção de objetos acima do terreno e de objetos considerados pequenos. As filtragens são exemplificadas nas subseções seguintes.

Tabela 1. Percentual de intensidade de retorno de alguns materiais.

Material	Reflexão(%)
Madeira clara, seca e limpa	94
Neve	80-90
Pedras claras	85
Calcário, argila	Até 75
Vegetação mista	60
Coníferas	30
Asfalto	17

Fonte: (GALVANIN, 2007)

4.1.3 Remoção de objetos acima do terreno

Considera-se que vias são caracterizadas por regiões do solo recobertas por asfalto. Devido a isso, vias urbanas não podem estar situadas acima do nível do terreno. Portanto, objetos acima do nível do terreno podem ser removidos.

Esta etapa foi útil para a remoção de objetos que são constituídos por material de

baixo retorno, mas possuem altura acima do terreno. O resultado desta filtragem é mostrado na Figura 6.

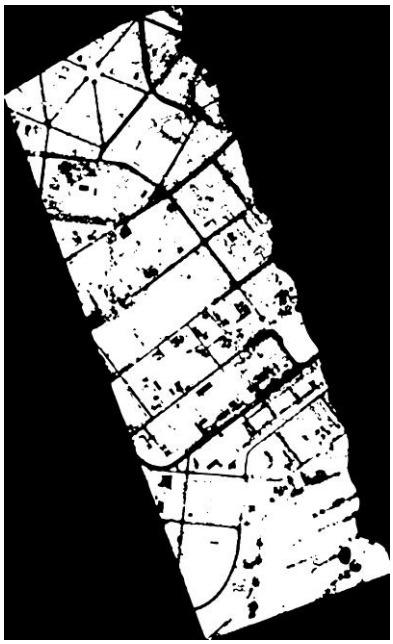


Figura 5. Imagem de retorno binarizada.



Figura 6. Resultado da remoção dos pontos que se encontram acima do nível do terreno.

Na Figura 7 é mostrada, no detalhe, a região com parte dos objetos removidos, por terem altura acima do limiar definido como terreno.

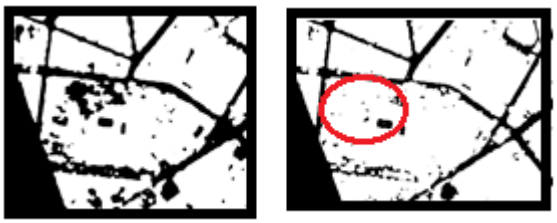


Figura 7. Destaque de área melhorada após a remoção de pontos acima do terreno.

4.1.4 Remoção de ruídos

Em seguida, foram removidos ruídos das imagens utilizando as operações de morfologia matemática erosão e dilatação. O processo permitiu remover pequenos ruídos e ressaltar partes importantes, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8. Imagem após aplicação de erosão e dilatação.

4.1.5 Remoção de objetos pequenos

Uma das características das vias urbanas é serem objetos grandes em pelo menos uma dimensão, ou seja, apesar de serem estreitos, possuem um formato alongado, facilitando a remoção de objetos pequenos. Para a realização dessa etapa foi

utilizado o algoritmo *Flood Fill* em duas partes. Na primeira parte é definido o tamanho do objeto. Esse tamanho foi calculado a partir da distância Euclidiana entre P1(*Xmin*, *Ymin*) e P2(*Xmax*, *Ymax*), em que *Xmin* e *Ymin* são os menores de valores das coordenadas *X* e *Y* dentre todos os pixels do objeto; e *Xmax* e *Ymax* são os maiores valores de *X* e *Y* dentre todos os pixels do objeto. O cálculo da distância Euclidiana é mostrado na Equação 4. A distância entre P1 e P2 corresponde à medida da diagonal do menor retângulo que circunscreve o objeto, conforme mostrado na Figura 9. O resultado dessa filtragem é mostrado na Figura 10.

$$D = \sqrt{(X\max - X\min)^2 + (Y\max - Y\min)^2} \quad (4)$$

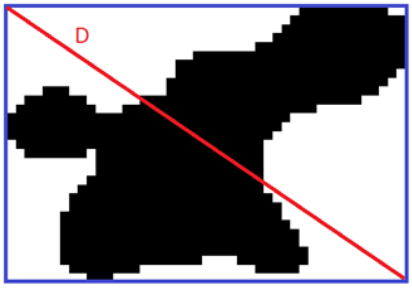


Figura 9. Medida do tamanho de um objeto.

4.1.6 Esqueletonização

A partir do resultado das filtragens e binarização aplicados aos dados laser foi gerado um esqueleto. O algoritmo de esqueletonização utilizado foi o proposto por Zhang e Suen (1984). Para a execução do algoritmo de Zhang e Suen são considerados apenas pixels que possuam 8 vizinhos, ou seja, pixels da borda são desconsiderados.



Figura 10. Objetos pequenos removidos a partir do tamanho.

Para cada pixel a ser analisado, nesse caso indicado por P1, são calculados A(P1) e B(P1). A(P1) é o número de transições de branco para preto percorrendo os vizinhos de P1 na sequência P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P2. Os vizinhos são definidos conforme a Figura 11. B(P1) é o número de vizinhos pretos de P1. O algoritmo é realizado em dois passos:

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

Figura 11. Vizinhos de P1 definidos para a esqueletonização.

No primeiro passo todos os pixels são testados verificando-se quais satisfazem todas as condições a seguir:

- É preto e possui 8 vizinhos
- $2 <= B(P1) <= 6$
- A(P1) = 1
- Pelo menos um dentre P2, P4 e P6 é branco.
- Pelo menos um dentre P4, P6 e P8 é branco.

Os pontos que satisfazem simultaneamente todas as condições descritas anteriormente são pintados de branco.

No segundo passo, todos os pixels são testados verificando-se quais satisfazem todas as condições a seguir:

- É preto e possui 8 vizinhos
- $2 <= B(P1) <= 6$
- A(P1) = 1
- Pelo menos um dentre P2, P4 e P8 é branco.
- Pelo menos um dentre P2, P6 e P8 é branco.

Os pontos que satisfazem simultaneamente todas as condições descritas anteriormente são pintados de branco. Os passos 1 e 2 são repetidos até que nenhum pixel seja alterado em nenhum dos dois passos. O resultado da esqueletonização é mostrado na Figura 12.

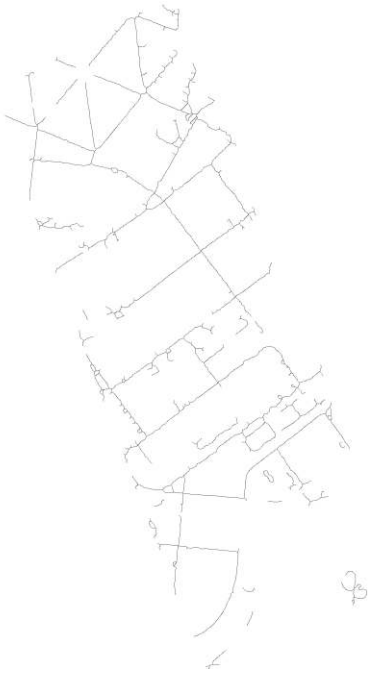


Figura 12. Esqueleto da imagem

Em seguida foram extraídos do esqueleto pontos importantes como extremidades e bifurcações. Um ponto no esqueleto é considerado extremidade se o pixel que o representa pertence ao esqueleto e contém exatamente um vizinho que também pertence ao esqueleto, conforme exemplificado na Figura 13.



Figura 13. Exemplo de extremidades detectadas.

Um ponto é considerado bifurcação se a partir desse ponto a linha se divide em duas ou mais linhas, ou se o ponto representa a interseção de duas ou mais linhas, conforme exemplificado na Figura 14.

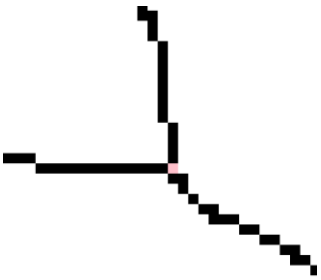


Figura 14. Exemplo de bifurcação detectada.

Para verificar se um pixel representa um ponto de bifurcação verifica-se a quantidade de pixels vizinhos que pertencem ao esqueleto. O pixel é considerado ponto de bifurcação caso tenha mais de dois vizinhos que pertençam ao esqueleto.

Para a contagem, considera-se primeiramente a vizinhança de 4, ou seja, os vizinhos de cima, de baixo, da esquerda e da direita do pixel central P, representados por P1, P2, P3 e P4 respectivamente (Figura 15). Os vizinhos das diagonais P12, P23, P34 e P41 somente são considerados se os vizinhos de 4 adjacentes a ele não pertencerem ao esqueleto. Por exemplo, o ponto P12 somente é verificado caso os pontos P1 e P2 não pertençam ao esqueleto. Da mesma forma, o ponto P23 é verificado somente se P2 e P3 não pertencerem ao esqueleto. O mesmo é feito com P34 e P41.

P41	P1	P12
P4	P	P2
P34	P3	P23

Figura 15. Vizinhança do pixel P.

A contagem é feita dessa maneira para evitar que alguns pontos sejam considerados bifurcação erroneamente. Por exemplo, alguns pontos contêm mais de dois vizinhos e não são pontos de bifurcação, como ilustrado na Figura 16, em que se tem um pixel (representado pelo quadrado vermelho) que, apesar de possuir 4 vizinhos pertencentes ao esqueleto (representados pelos quadrados azuis), não é um ponto de bifurcação.

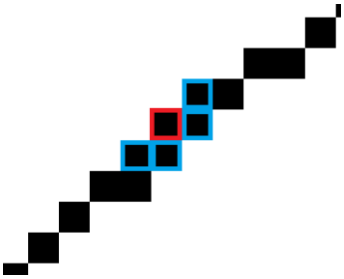


Figura 16. Exemplo de erro na contagem de vizinhos.

4.1.7 Segmentos

A partir dos pontos de bifurcação e extremidades, o esqueleto é dividido em segmentos. Cada segmento corresponde a uma sequência de pontos contínuos a partir de um ponto de bifurcação ou extremidade até o próximo ponto de bifurcação ou extremidade, como exemplificado na Figura 17. Esses segmentos serão utilizados na reconstrução de algumas vias.

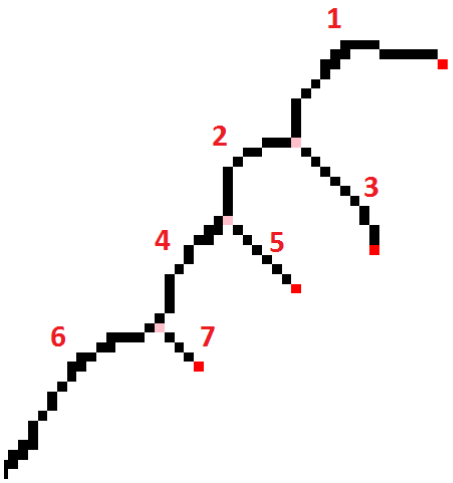


Figura 17. Parte do esqueleto dividido em 6 segmentos definidos por pontos de bifurcação e extremidade.

4.1.8 Ligação dos segmentos

Esses segmentos representam possíveis vias. Em alguns casos, parte da via não é detectada de forma que o segmento que o representa fica desconexo. Dessa forma, uma via que deveria ser representada por um único segmento contínuo, acaba sendo representada por dois ou mais segmentos menores. Para resolver esse problema é feita a ligação desses segmentos, conforme mostrado na Figura 18.



(a) (b) (c)

Figura 18. (a) Imagem binarizada gerada a partir dos dados laser, (b) imagem esqueletonizada com segmento desconexo e (c) imagem esqueletonizada após ligação de segmentos.

A ligação de segmentos é feita em duas etapas. A primeira etapa consiste em regras baseadas em angulação e distância. Os limites de angulação e distância foram definidos de forma empírica. A distância é determinada pela distância Euclidiana (mostrada na Equação 4) entre os extremos de cada segmento. Essa distância deve ser menor que o limite estabelecido pela regra. Para o cálculo do ângulo são definidos três vetores, um para cada segmento e um para o novo segmento que será formado. Por exemplo, na Figura 19 têm-se os vetores V1=(a1,a2) representando o segmento A, V2=(b1,b2) representando o segmento B e V3=(a2,b1) representando a possível ligação entre os segmentos A e B. São calculados os ângulos entre V1 e V2 e entre V1 e V3. Esses ângulos devem ser menores que o limite estabelecido pela regra. O ângulo entre dois vetores é calculado pela Equação 5.

$$\alpha = arcos\left(\frac{u.v}{|u|.|v|}\right) \qquad (5)$$

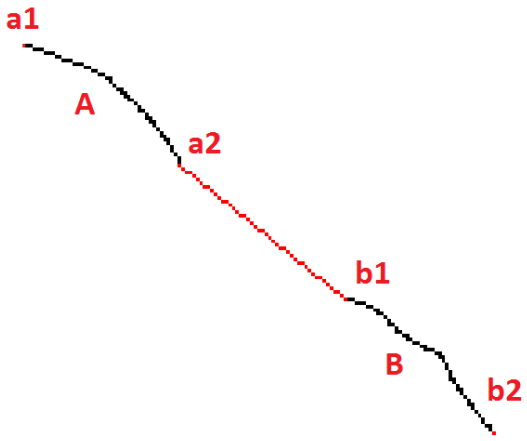


Figura 19. Exemplo de ligação de segmentos.

Na segunda etapa são definidos limites de ângulo e distância maiores, porém

é acrescida a regra de que a região entre os dois pontos a serem unidos sejam verdes. Nesse caso, é levada em consideração a hipótese de naquele local existir uma via urbana encoberta por árvores. São considerados verdes os pixels que satisfazem a condição *(R/G)<1.12* e *(B/G)<1.05* e *(R+G+B)<310*, em que R, G e B são os componentes vermelho, verde e azul do sistema RGB. A condição acima utilizada para a detecção de pontos verdes se mostrou bastante eficaz conforme ilustrado na Figura 20.

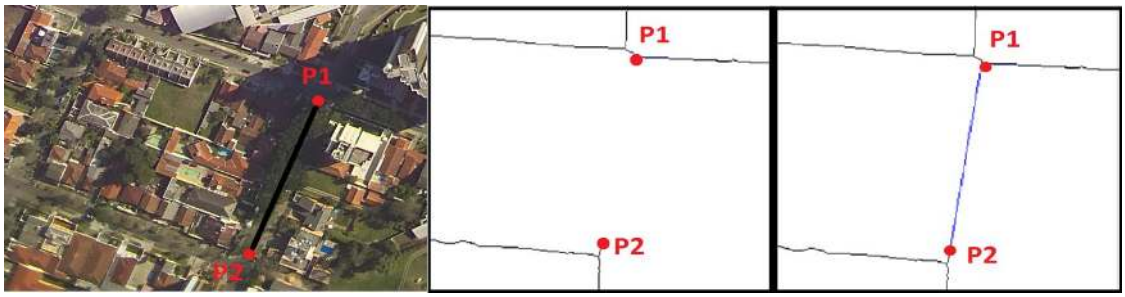
As informações de cor estão presentes nas imagens digitais, portanto, para esta etapa, utiliza-se a matriz de correspondência gerada a partir do *matching,* em que se encontram os pontos P1 e P2 na imagem digital que correspondem aos pontos nos dados laser que serão unidos (extremidades dos segmentos).



(a) (b)

Figura 20. (a) Imagem digital original e (b) imagem com regiões verdes destacadas.

Depois de encontrados os pontos P1 e P2 na imagem digital, percorrem-se os pixels entre eles utilizando o algoritmo de Bresenham (1965). Na Figura 21 é mostrado um exemplo de reta ligada nessa etapa.



(a) (b) (c)

Figura 21. Exemplo de ligação de segmentos realizados analisando área arborizada. (a) Imagem digital, (b) pontos a serem ligados e (c) resultado do processo de junção.

O algoritmo de Bresenham retorna quais pixels pertencem à reta que liga dois pixels, conforme ilustrado na Figura 22.

Todos os pixels pertencentes à reta são verificados em relação à cor. É feita a ligação quando pelo menos 65% dos pontos na reta são verdes.

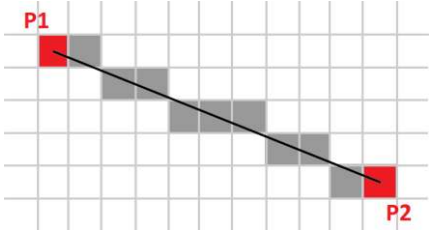
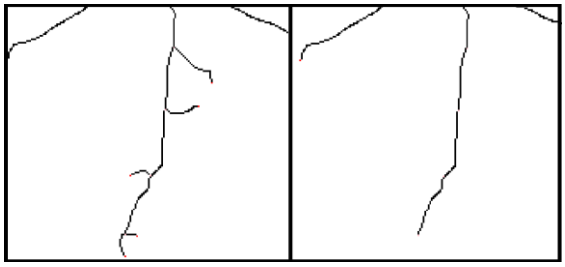


Figura 22. Pontos pertencentes à reta que liga P1 e P2 definidos pelo algoritmo de Bresenham.

4.1.9 Remover Segmentos Pequenos

Alguns seguimentos são muito pequenos gerados por ruído e não representam vias, portanto, precisam ser removidos. Para isso, calcula-se o tamanho de um segmento pela quantidade de pixels que o formam. O tamanho limite para a remoção dos segmentos foi definida de forma empírica. Na Figura 23 são mostrados alguns segmentos removidos.

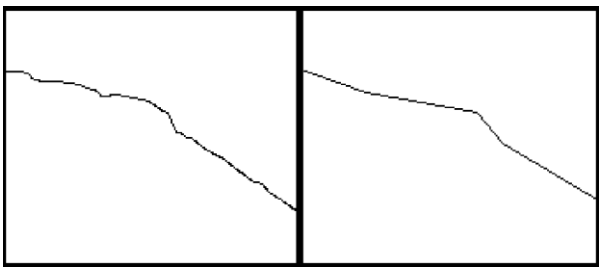


(a) (b)

Figura 23. Exemplo de remoção de segmentos pequenos. (a) Imagem com segmentos a serem removidos. (b) Imagem resultante.

4.1.10 Suavização dos segmentos

Foi aplicado o algoritmo proposto por Douglas e Peucker (1973) para a suavização das linhas obtidas. O algoritmo remove pontos que causam curvas pequenas, dessa forma as curva pequenas são eliminadas. No entanto, pontos que representam curvas maiores são mantidos de forma a manter as curvas mais significativas, conforme ilustrado na Figura 24.



(a) (b)

Figura 24. Exemplo de suavização de segmento. (a) Imagem original. (b) Imagem com segmentos suavizados.

5 RESULTADOS

Foram realizados experimentos utilizando três conjuntos de dados laser e imagens de uma área urbana, da cidade de Curitiba/PR. Cada conjunto de teste representa uma região com sobreposição, formando a área urbana.

Para análise dos resultados foram elaboradas máscaras (Figuras 25(b), 27(b) e 29(b)), manualmente, tomando por base os dados lasers e as imagens digitais dos três conjuntos de dados. Essas máscaras foram utilizadas para a validação dos resultados obtidos após aplicação do algoritmo.

Ao final de todo o processamento é gerada uma imagem com as vias identificadas. Para a validação dos resultados é realizada a subtração entre a imagem resultante e a máscara. Com isso, foram contabilizados os pontos correspondentes aos verdadeiros positivos (vias urbanas) e falsos positivos (regiões identificadas erroneamente). A contabilização dos pontos referentes aos falsos negativos (vias não identificadas) foi realizada manualmente

demarcando esses pontos na imagem resultante.

Na Figura 26 são representados pontos detectados corretamente (em preto) e os pontos detectados erroneamente (falso positivo em vermelho e falso negativo em verde) do primeiro conjunto de dados.

O processo foi aplicado também a outros dois conjuntos de dados. Na Figura 28 e na Figura 30 mostram os resultados do segundo e do terceiro conjunto de dados.

Realizou-se a contagem dos pixels pretos, vermelho e verde para cada experimento. Os resultados são mostrados na Tabela 2. Foram também calculados a Sensibilidade, que mede a capacidade de se identificar corretamente as vias urbanas entre aquelas que realmente existem, e o Valor Preditivo Positivo, que representa a proporção de vias urbanas identificadas corretamente, conforme a Equação 6 e a Equação 7, respectivamente:

$$S = VP/(VP + FN) \quad (6)$$

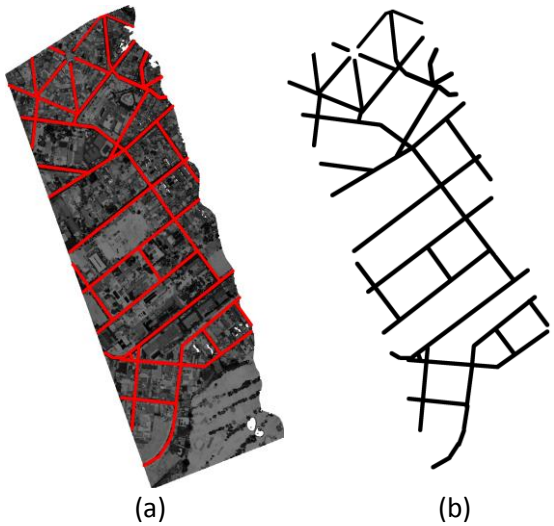
$$VPP = VP/(VP + FP) \quad (7)$$

sendo S a Sensibilidade, VP a quantidade de Verdadeiros Positivos, FN a quantidade de Falsos Negativos, VPP o Valor Preditivo Positivo e FP a quantidade de Falsos Positivos.

Tabela 2. Contagem dos Resultados.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
Verdadeiros Positivos (VP)	10966	12249	15174
Falso Positivo (FP)	2671	5980	4440
Falso Negativo (FN)	611	1011	1103
Sensibilidade (S)	94.7%	92.4%	93.2%
Valor Preditivo Positivo (VPP)	80.4%	67.2%	77.4%

Com base nos resultados apresentados, pode-se notar que o algoritmo desenvolvido obteve boa taxa de sensibilidade, sendo capaz de detectar corretamente as vias urbanas nos três experimentos. Entretanto, o Valor Preditivo Positivo, nos três experimentos, apresenta uma taxa menor devido ao fato do algoritmo detectar como vias estacionamentos ou entradas de garagens (falsos positivos).



(a) (b)

Figura 25. (a) Dados de retorno laser e máscara sobreposta. (b) Máscara gerada manualmente (primeiro conjunto de dados).

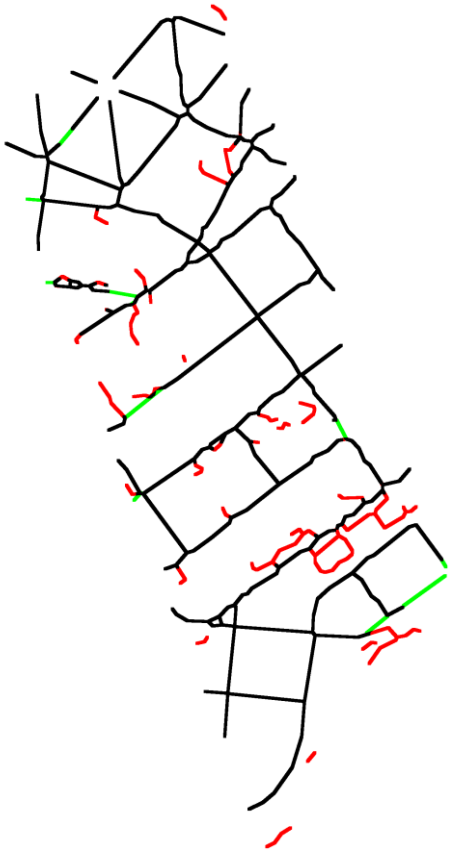
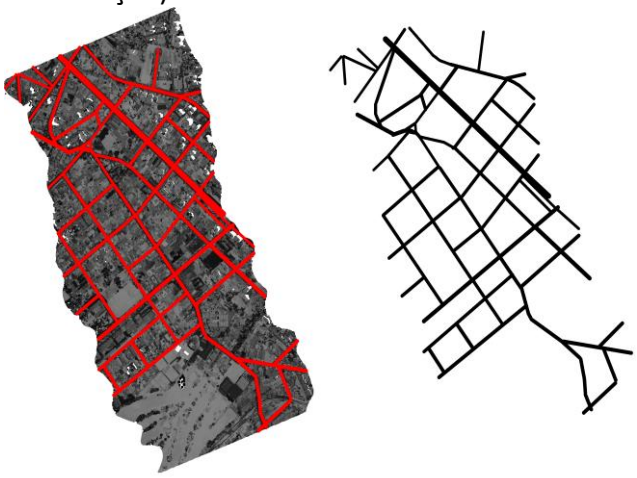


Figura 26. Imagem contendo erros e acertos do algoritmo para o primeiro conjunto de teste (a imagem, cujas linhas possuíam largura de um pixel, foi dilatada para melhor visualização).



(a) (b)

Figura 27. (a) Dados de retorno laser e máscara sobreposta. (b) Máscara gerada manualmente (segundo conjunto de dados).

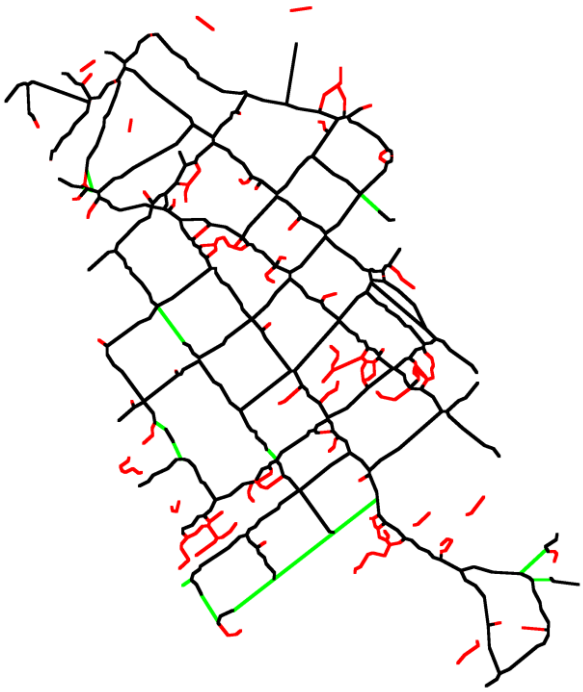
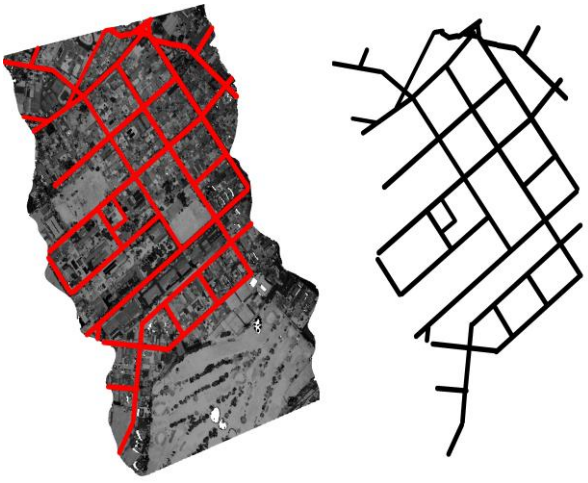


Figura 28. Imagem contendo erros e acertos do algoritmo para o segundo conjunto de teste (a imagem, cujas linhas possuíam largura de um pixel, foi dilatada para melhor visualização).



(a) (b)

Figura 29. (a) Dados de retorno laser e máscara sobreposta. (b) Máscara gerada manualmente (terceiro conjunto de dados).



Figura 30. Imagem contendo erros e acertos do algoritmo para o terceiro conjunto de teste (a imagem, cujas linhas possuíam largura de um pixel, foi dilatada para melhor visualização).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de diferentes tipos de informação: intensidade de retorno, altitude e cor, auxiliou na extração de vias urbanas. Cada tipo de informação apresentou contribuições únicas de forma que a combinação aprimorou o resultado final. Com base nos experimentos realizados, notou-se que o número de falsos positivos foi maior em relação ao número de falsos negativos, e verificou-se que na maioria dos casos isso ocorreu por causa das áreas de estacionamento ou entradas de garagens. Os falsos negativos ocorreram, em geral, devido à oclusão das vias por árvores. Em regiões onde uma pequena parte da via estava encoberta por árvores, o algoritmo foi capaz de detectá-la. No entanto, a reconstrução não foi possível nos casos com distância relativamente grande entre os segmentos.

Uma das dificuldades encontradas foi o uso de imagens com deformações perspectivas, devido ao ângulo de visão das câmeras. Esse problema afetou principalmente as regiões mais próximas às extremidades da foto, em que o casamento entre os dados lasers e a imagem apresentou deslocamentos. O uso de ortofotos eliminaria o problema, no entanto, esse tipo de imagem não estava à disposição.

Como trabalho futuro, existe a possibilidade de refinar a detecção de vias urbanas utilizando uma quantidade maior de dados de pontos laser e uma quantidade maior de imagens de uma mesma área. Além disso, outras regras podem ser criadas para melhor detectar as regiões de vias. Pode-se também desenvolver métodos de *matching* mais precisos caso não seja possível adquirir ortofotos. As vias urbanas possuem variação de largura, seria interessante que o algoritmo detectasse automaticamente a largura de cada via.

REFERÊNCIAS

ALVES, F.L.B. **Avaliação da extração semiautomática de rodovias sobre uma imagem híbrida para atualização cartográfica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Cartográfica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY . **Manual of Photogrammetry.** 1966, 1220p.

ARAKI, H. **Fusão de informações espectrais, altimétricas e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução espacial.** 2005. 126p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.

BRESENHAM, J.E. Algorithm for computer control of a digital plotter. **IBM, Systems Journal**, v.4, n.1, p.25-30, 1965. http://dx.doi.org/10.1147/sj.41.0025

CARDOSO, W.F.; SILVA, F.A.; PAZOTI, M.A. Geração de modelo digital de terreno por meio da filtragem de dados obtidos por varredura a laser utilizando um método baseado no princípio da declividade. **Colloquium Exactarum**, v.6, p.46-64, 2014. http://dx.doi.org/10.5747/ce.2014.v06.n1.e068

CASTRO, F.S.P.; DEBIASI, P.; CENTENO, J.A.S. Extração de estradas em imagens de intensidade laser utilizando morfologia matemática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 14. **Anais...** Natal: INPE, 2009, p.5001-5007.

CENTENO, J.A.S.; MITISHITA, E.A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: a experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., **Anais...** Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE. p. 3645-3652.

DAL POZ, A.P.; VALE, G.M. ; ZANIN, R.B. Extração automática de feições rodoviárias em imagens digitais. **Revista Controle e Automação**, v.18, n.1, p.44-54, 2007.

DOUGLAS, D.; PEUCKER, T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **The Canadian Cartographer**, v.10, n.2, p.112-122, Dec. 1973. http://dx.doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727

FACON, J. A Morfologia matemática e suas aplicações em processamento de imagens. In: WORKSHOP DE VISAO COMPUTACIONAL, 7. **Anais...** 2011. p.61-128.

GALVANIN, E.A.S. **Extração automática de contornos de telhados de edifícios em um modelo digital de elevação, utilizando inferência bayesiana e campos aleatórios de Markov**. 2007. 165p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente - SP.

HU, X; TAO, C.V.; HU, Y. Automatic road extraction from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery LIDAR data. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCE. **Anais...** Istanbul, v.35, p.320-325, 2004.

MENDES, T.S.G., FAZAN, A.J., POZ, A.P.D. **Delineamento de estradas vicinais usando técnicas de correlação de imagens**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – FCT/UNESP. Presidente Prudente, SP, 2004.

SILVA, M. A. O. **Detecção e Reconstrução Automática de Junções de Rodovia em Imagens Digitais de Cenas Rurais**. 2003. Mestrando do Programa de Pós – Graduação em Ciências Cartográficas – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente - SP.

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre.** 2006. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.

ZHANG, T.Y., SUEN, C.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns.

Communications of the ACM, p.236-239, march 1984. http://dx.doi.org/10.1145/357994.358023