

PREDIÇÃO DE SOMBRAS DE EDIFÍCIOS SOBRE VIAS URBANAS COM BASE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÕES E DADOS DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA RESOLUÇÃO

*Prediction of building shadows cast on urban roads based on digital elevation
models and high resolution aerial imagery data*

ANTONIO JULIANO FAZAN ⁽¹⁾
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ ⁽²⁾

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT – Campus de Presidente Prudente – SP

⁽¹⁾ Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas –
ajfazan2000@yahoo.com.br

⁽²⁾ Departamento de Cartografia – aluir@fct.unesp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a predição de sombras projetadas por edifícios sobre vias urbanas presentes em imagens aéreas de alta resolução. Elementos de sombra podem ser usados na modelagem de informação contextual, cujo uso tem se tornado bastante comum em processos complexos de análise de imagem. A metodologia consiste de três etapas sequenciais. Primeiramente, os contornos de telhados de edifícios são extraídos manualmente a partir de uma imagem altimétrica obtida pela transformação de um modelo digital de elevações derivado de dados de varredura a laser aerotransportado. De maneira similar, os contornos dos limites das vias são extraídos a partir da imagem de intensidade laser. Na etapa seguinte, os polígonos dos contornos de telhado são projetados nas vias adjacentes através de retas de projeção paralela, cuja direção é calculada a partir de dados de efemérides solares e do instante de tomada da imagem aérea. Finalmente, as partes dos polígonos de sombra que estão livres de obstruções perspectivas de edifícios são determinadas a partir da separação das regiões afetadas por obstruções perspectivas. Os resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia mostraram que o método realiza a predição das sombras de edifícios com alta acurácia e confiabilidade.

Palavras-Chave: Projeção paralela; Sombras de edifícios; Efemérides solares; Imagens aéreas; Modelos digitais de elevações; Sistemas aerotransportados de varredura a laser.

ABSTRACT

This research presents a methodology for prediction of building shadows cast on urban roads existing on high-resolution aerial imagery. Shadow elements can be used in the modeling of contextual information, whose use has become more and more common in image analysis complex processes. The proposed methodology consists in three sequential steps. First, the building roof contours are manually extracted from an intensity image generated by the transformation of a digital elevation model (DEM) obtained from airborne laser scanning data. In similarly, the roadside contours are extracted, now from the radiometric information of the laser scanning data. Second, the roof contour polygons are projected onto the adjacent roads by using the parallel projection straight lines, whose directions are computed from the solar ephemeris, which depends on the aerial image acquisition time. Finally, parts of shadow polygons that are free from building perspective obstructions are determined, given rise to new shadow polygons. The results obtained in the experimental evaluation of the methodology showed that the method works properly, since it allowed the prediction of shadow in high-resolution imagery with high accuracy and reliability.

Keywords: Parallel Projection; Building Shadows; Solar Ephemeris; Aerial Images; Digital Elevation Models; Airborne Laser Scanning Systems.

1. INTRODUÇÃO

Um dos aspectos fundamentais para as metodologias de extração automática da malha viária é o tipo de cena envolvida. Os principais tipos de cena que podem estar presentes em imagens para aplicações cartográficas são a rural, a suburbana e a urbana. A diferença fundamental no tratamento destas imagens é a relevância das informações contextuais, que são as relações espaciais existentes entre o objeto de interesse e os demais presentes na cena. Exemplos de objetos no contexto das vias urbanas (ruas, avenidas, alamedas etc.) são aqueles que de alguma forma provocam alterações nas suas projeções numa imagem, como é o caso dos edifícios, árvores e veículos. Em particular, os edifícios (que são feições antrópicas) interagem de duas formas diferentes com as vias. A primeira delas é através das projeções perspectivas e a segunda por meio das projeções de sombra. Esta última depende fundamentalmente da orientação solar no instante de tomada da imagem. Já a projeção perspectiva depende da posição e da atitude do sensor no instante do imageamento, da distância focal da câmara e do relevo do terreno. Em ambos os casos, essas projeções podem provocar obstruções nas vias urbanas, que dependem, além dos fatores mencionados, da altura dos edifícios.

De um modo geral, as projeções de sombras são regiões muito comuns em imagens aéreas ou orbitais de alta resolução, principalmente em cenas urbanas complexas. A principal razão para a ocorrência das sombras é o bloqueio direto da luz solar por feições como edifícios, árvores e nuvens. Conseqüentemente, as superfícies afetadas são fracamente iluminadas e aparecem escuras nas imagens. Os efeitos negativos das sombras degradam a qualidade visual das imagens, modificando a resposta espectral das regiões sombreadas e causando perturbações severas na análise dessas imagens. As sombras dificultam tarefas como, por exemplo, a correspondência de imagens para a extração de elevações, a detecção de alterações cadastrais, a extração automática de edifícios e da malha viária etc. (LI et al.; MADHAVAN et al.; MASSALABI et al., 2004).

As regiões de sombra presentes em uma imagem podem ser utilizadas, por exemplo, na modelagem de informações de contexto para metodologias de extração automática da malha viária. O uso de conhecimento contextual tem se tornado cada vez mais comum no desenvolvimento dessas metodologias, principalmente em se tratando de imagens de cenas urbanas. Por exemplo, Hinz e Baumgartner (2000, 2002) e Hinz et al. (2001) utilizaram informações contextuais para localizar partes de uma imagem onde é mais fácil extrair segmentos de ruas em cenas urbanas complexas. Nesses casos, as regiões de sombra presentes nas imagens são derivadas através do método de Eckstein e Steger (1996) apresentado anteriormente. Outro exemplo de uso de informações de contexto é encontrado em Price (2000), onde para definir os limites de vias urbanas, é utilizado o conhecimento prévio de que objetos altos (tais como edifícios e árvores) as margeiam. Como mostra Baumgartner et al. (1999), as informações de contexto também podem ser úteis para extrair a malha viária presente em imagens de cenas rurais. As informações contextuais foram utilizadas neste último trabalho para verificar hipóteses de conexão entre segmentos de rodovias previamente extraídos. Enquanto que nesse caso o conhecimento contextual é uma opção para complementar a extração da malha viária, em imagens de cenas urbanas as informações contextuais possuem importância fundamental.

Algumas das características mais comumente exploradas em análise de imagem para detectar regiões de sombras ou compensar seus efeitos negativos são (MASSALABI et al., 2004): (1) Sombras são regiões formadas por pixels com baixo valor de intensidade; (2) A forma de uma sombra é função da forma do objeto que a produz; (3) Uma ou mais extremidades de uma região sombreada são orientadas na direção do azimute solar (para o instante de tomada da imagem); (4) A área de uma sombra depende da altura solar (para o instante de tomada da imagem) e da altura do objeto que a produz.

Em geral, os métodos tratados na literatura especializada para detectar regiões de sombras e compensar seus efeitos negativos em imagens podem ser classificados em dois grandes grupos: o primeiro deles emprega basicamente dados de imagem em conjunto com técnicas convencionais de análise (limiarização, segmentação etc.), explorando principalmente propriedades radiométricas para tratar o problema

das sombras. Por exemplo, Gwinner e Schaale (1997) utilizaram limiarização do histograma para detectar as regiões de sombra presentes em uma imagem. Alternativamente, outras propriedades podem ser exploradas para melhorar a detecção das sombras ou validar os resultados obtidos. Massalabi et al. (2004) propõem um método para a detecção de sombras baseado em uma análise hierárquica de propriedades radiométricas, geométricas, contextuais e de textura, a partir de uma imagem previamente obtida por segmentação contendo regiões candidatas a sombras. Madhavan et al. (2004) utilizam um método para a extração de sombras existentes em imagens aéreas de alta resolução baseado em filtragem, segmentação e análise da média móvel. Outros exemplos podem ser encontrados em Suzuki et al. (2000), Prati et al. (2001), Polidorio et al. (2003) e Santos et al. (2006).

No que se refere ao segundo grupo, geralmente são empregados dados de imagens combinados com outras fontes de informação para se obter as regiões de sombras presentes em uma imagem. Nesse caso, a estratégia adotada é semelhante em praticamente todos os métodos encontrados na literatura: as regiões de sombras são determinadas através de uma simulação (predição) empregando dados de elevações, geralmente derivados de um modelo digital de superfície (MDS) e de dados de posição solar (azimute e altura), estimados para o instante do imageamento. Um exemplo é o método proposto por Eckstein e Steger (1996): as regiões de sombra presentes em uma imagem são inicialmente preditas a partir de dados de um MDS e de informações solares, sendo refinadas na seqüência através de segmentações e limiarizações da imagem.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a predição de regiões existentes em imagens aéreas de alta resolução afetadas pela projeção de sombras de edifícios. A metodologia utiliza dados de sistemas aerotransportados de varredura a laser em conjunto com dados de efemérides solares e informações de orientação do sensor para determinar as partes das sombras de edifícios projetadas sobre as vias urbanas que estão visíveis em uma imagem aérea.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho para a predição de regiões de sombras de edifícios sobre vias urbanas presentes em imagens aéreas de alta resolução é baseada em uma modelagem geométrica das sombras no referencial cartesiano local e divide-se em três etapas principais:

- Extração manual dos contornos de telhados de edifícios e limites das vias urbanas;
- Predição automática das sombras de edifícios em um referencial cartesiano local;
- Registro das sombras preditas na imagem aérea.

2.1 Extração dos contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas

2.1.1 Transformação do MDE/laser em uma imagem altimétrica

Para determinar visualmente e medir manualmente os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas, primeiramente é necessário transformar o MDE derivado dos dados de varredura a laser (MDE/laser) da área correspondente em uma imagem altimétrica em níveis de cinza. Esse procedimento envolve duas transformações geométricas, que compreendem a aplicação de um fator de escala nos componentes planimétricos e outro no componente altimétrico do MDE, produzindo uma imagem digital cujos valores de brilho são proporcionais às alturas dos pontos do MDE.

Para transformar o MDE em uma imagem altimétrica, é necessário definir inicialmente a resolução espacial da imagem no terreno (GSD). Em seguida, são calculadas suas dimensões (altura e largura), ou seja, o número de linhas (h) e colunas (w), respectivamente através das Equações (FAZAN, 2007)

$$h = (N_{\max} - N_{\min}) / \text{GSD} \quad (1)$$

$$e \quad w = (E_{\max} - E_{\min}) / \text{GSD} , \quad (2)$$

onde:

- E_{\min} e E_{\max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo do componente E do MDE;
- N_{\min} e N_{\max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo do componente N do MDE.

O próximo passo é o estabelecimento de uma relação matemática entre a posição (C, L) de um elemento da imagem altimétrica e sua respectiva posição planimétrica no MDE, representada pelas coordenadas (E, N) referenciadas ao sistema de projeção UTM. Esse procedimento é realizado refletindo-se o eixo N e transladando o MDE de tal forma que o canto superior esquerdo do retângulo que o delimita corresponda ao pixel de coordenadas (0, 0) na imagem. Além disso, deve-se aplicar o fator de escala estabelecido pela resolução espacial da imagem. Para calcular as coordenadas (C, L) de um ponto na imagem altimétrica correspondente ao ponto de coordenadas planimétricas (E, N) no MDE, empregam-se as Equações (FAZAN, 2007)

$$C = (E - E_{\min}) / \text{GSD} \quad (3)$$

$$e \quad L = (N_{\max} - N) / \text{GSD} . \quad (4)$$

Tendo em vista a geração de uma imagem com resolução radiométrica de 8 bits, onde os possíveis valores de brilho que os elementos da imagem podem

assumir estão no intervalo $[0; 255]$, os componentes altimétricos dos pontos do MDE são escalados de tal forma que a altitude mínima corresponda ao valor de brilho zero e a altitude máxima corresponda ao valor de brilho 255. Essa operação consiste em determinar o valor de brilho ND que será atribuído na posição (C, L) da imagem calculada anteriormente, através da Equação (FAZAN, 2007)

$$ND = \frac{255}{H_{\max} - H_{\min}} \cdot (H - H_{\min}), \quad (5)$$

onde:

- H_{\max} é o valor da cota do ponto de maior altitude no MDE;
- H_{\min} é o valor da cota do ponto de menor altitude no MDE;
- H é a altitude ortométrica do ponto de coordenadas (E, N) no MDE corresponde ao elemento de coordenadas (C, L) na imagem.

Uma vantagem do procedimento descrito anteriormente é que as transformações geométricas dadas pelas Equações 3, 4 e 5 são inversíveis, o que permite calcular as coordenadas (E, N, H) de um ponto no MDE a partir de um pixel com coordenadas (C, L, ND) observado na imagem gerada.

2.1.2 Extração dos contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas

Após a transformação do MDE em imagem altimétrica, os contornos dos telhados dos edifícios podem ser obtidos a partir da identificação visual e medição manual das coordenadas dos pontos que os definem. Para medir as coordenadas dos pontos que definem os limites das vias urbanas, é utilizada a imagem de intensidade de retorno do pulso laser, previamente registrada com a imagem altimétrica obtida a partir do MDE/laser.

O motivo básico para a necessidade desse registro é que as informações posicionais e de altitude dos pontos que definem os limites de uma via delimitada são obtidas a partir da imagem altimétrica produzida pela transformação do MDE/laser. Isso significa que os elementos da imagem de intensidade de retorno do pulso laser (a partir da qual são identificados e medidos os pontos que definem os limites das vias) devem ser correspondentes aos elementos da imagem altimétrica.

A principal razão para a necessidade de uso da imagem de intensidade de retorno do pulso laser é que os limites das vias urbanas geralmente não aparecem bem definidos na imagem altimétrica obtida a partir da transformação do MDE/laser. Para o caso da imagem de intensidade de retorno do pulso laser, ocorre justamente o contrário, uma vez que essa imagem contém a informação de resposta espectral dos alvos presentes na cena.

Como o material asfalto reflete pouco nos comprimentos de onda utilizados pelos sistemas aerotransportados de varredura a laser, as vias geralmente aparecem como regiões escuras homogêneas e bem definidas na imagem de intensidade de retorno do pulso laser, o que facilita seu processo de extração manual. A Figura 1

mostra exemplos de extração manual de contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas.

Figura 1 – Extração (a) de contornos de telhados de edifícios em uma imagem altimétrica obtida a partir de um MDE e (b) de limites de uma via urbana em uma imagem de intensidade de retorno do pulso laser.



2.1.3 Transformação dos telhados de edifícios e limites de vias urbanas para o referencial cartesiano local

As coordenadas dos pontos que definem os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas estão no referencial digital (C, L, ND). Como as coordenadas do MDE geralmente estão associadas ao referencial UTM com altitude ortométrica, essas coordenadas devem ser transformadas para (E, N, H) para serem posteriormente transformadas para o referencial cartesiano local, onde é realizada a predição das sombras de edifícios. Para obter as coordenadas (E, N, H) dos pontos que definem os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas, aplicam-se as inversas das Equações 3, 4 e 5, dadas por (FAZAN, 2007)

$$E = E_{\min} + C \cdot \text{GSD} , \quad (6)$$

$$N = N_{\max} - L \cdot \text{GSD} , \quad (7)$$

$$e \quad H = H_{\min} + \text{ND} \cdot \left[\frac{H_{\max} - H_{\min}}{255} \right] . \quad (8)$$

As coordenadas resultantes são submetidas a uma seqüência de transformações para se obter as coordenadas dos pontos correspondentes no referencial cartesiano local, onde é realizada a predição das regiões das sombras de edifícios que se projetam sobre as vias urbanas.

2.2 Obtenção das sombras de edifícios visíveis no espaço-imagem

2.2.1 Obtenção das projeções de sombra dos edifícios sobre o PMHLV

Nesta etapa são obtidas as projeções de sombra sobre o plano médio horizontal local da via (PMHLV) adjacente a cada edifício. Para tanto, o primeiro passo consiste em projetar ortogonalmente os pontos que definem o contorno do telhado de cada edifício no seu respectivo PMHLV, a fim de obter polígonos que definem as

bases dos edifícios. Para isso é necessário conhecer a altura de cada edifício, que é obtida pela diferença entre a altitude média de cada contorno de telhado e a altitude do PMHLV, calculada com base nas altitudes dos pontos que definem os limites da via adjacente ao(s) edifício(s) considerado(s).

Em seguida, os pontos representando o contorno de telhado de cada edifício são projetados no PMHLV através da projeção paralela. A razão para o uso da projeção paralela é o fato de que o centro de projeção, para o caso de sombras, se relaciona com a posição da fonte de iluminação (Sol): no caso, como este se encontra muito distante da superfície terrestre, pode ser considerado como sendo posicionado no infinito.

Para obter as retas de projeção paralela é necessária, além da altura dos edifícios, a posição (orientação) do Sol no instante de tomada da imagem aérea, em um sistema de referência compatível com o cartesiano local. As coordenadas que definem a posição do Sol nesse sistema são o azimute (A) e altura (h), ou seja, a posição do Sol em relação ao sistema astronômico horizontal (MUELLER, 1977). Os valores dessas coordenadas são estimados a partir de dados de efemérides astronômicas do Sol e do instante de tomada da imagem aérea, através de transformações entre sistemas de coordenadas astronômicos.

Após a obtenção das coordenadas horizontais do Sol, são definidas as equações das retas de projeção paralela utilizadas para projetar os pontos dos contornos de telhados de edifícios no PMHLV. Essas equações são definidas na forma paramétrica e são dadas por (FAZAN, 2007)

$$X_p = X_T + (Z_p - Z_T) \frac{\cos(A)}{\operatorname{tg}(h)} \quad (9)$$

$$e \quad Y_p = Y_T + (Z_p - Z_T) \frac{\operatorname{sen}(A)}{\operatorname{tg}(h)}, \quad (10)$$

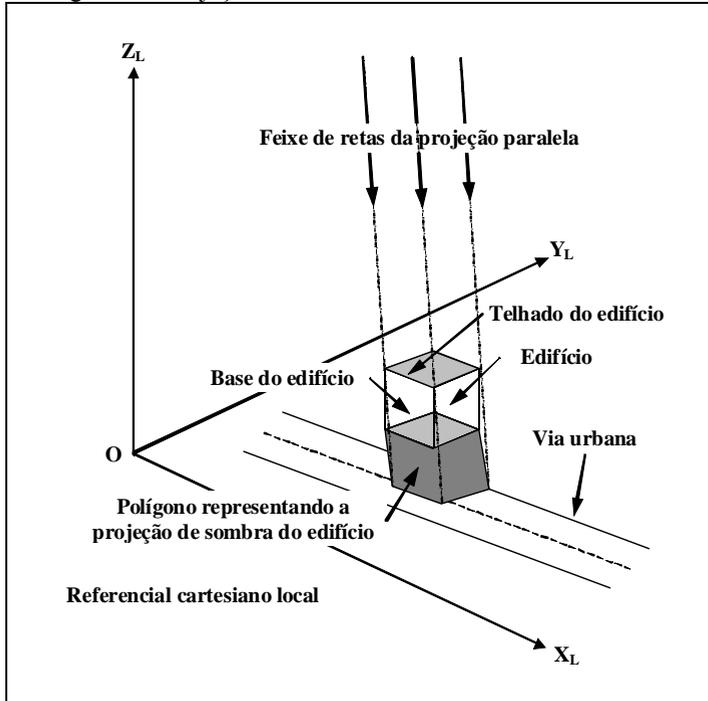
onde:

- (X_p, Y_p) são os componentes planimétricos dos vértices de um contorno de telhado projetado no PMHLV (no referencial cartesiano local);
- (X_T, Y_T, Z_T) são as coordenadas dos pontos representativos dos contornos de telhados de edifícios (no referencial cartesiano local);
- Z_p é a altura do PMHLV em relação ao referencial cartesiano local.

Para obter os componentes planimétricos dos vértices representativos dos contornos de telhados projetados no PMHLV a partir da posição (orientação) espacial do Sol, da altura do PMHLV e das coordenadas dos pontos que definem o contorno dos telhados dos edifícios, aplicam-se diretamente as Equações 9 e 10. É interessante notar que essas equações não são definidas para $h = 0^\circ$ (nascer e ocaso do Sol) nem para $h = 90^\circ$ (passagem meridiana superior do Sol). De fato, é esperado que nos referidos instantes não haja projeções de sombras de edificações.

No estágio final desta etapa, os polígonos representando as bases dos edifícios são combinados com os respectivos polígonos projetados paralelamente no PMHLV, de modo a obter uma representação no referencial cartesiano local para a sombra projetada por cada edifício. Um exemplo explicativo é mostrado pela Figura 2.

Figura 2 – Projeção da sombra de um edifício no PMHLV.



2.2.2 Determinação das regiões de sombra sobre as vias urbanas

Depois da obtenção das projeções de sombras dos edifícios sobre o PMHLV, são determinadas as regiões dessas projeções compreendidas entre os limites das vias urbanas adjacentes aos edifícios considerados. Para tanto, é determinada a região de intersecção entre o polígono que define a projeção da sombra do edifício e o polígono que define o segmento da via considerada. Essa região define a obstrução causada pela projeção da sombra do edifício sobre a via urbana.

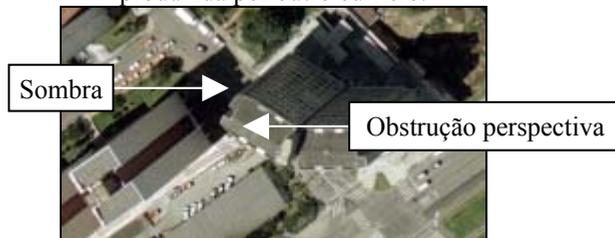
2.2.3 Seleção das partes das sombras visíveis na imagem aérea

Para selecionar as partes das sombras preditas na etapa anterior que estão visíveis na imagem aérea, é necessário conhecer os parâmetros de orientação exterior do sensor no instante de tomada da imagem aérea, ou seja, a posição

espacial (X_0, Y_0, Z_0) do centro perspectivo (CP) e os ângulos de atitude (ω, φ, κ) da câmara aérea. Com base nestes parâmetros, são determinadas as obstruções causadas pela projeção perspectiva dos edifícios sobre as vias urbanas. Esse procedimento difere daquele descrito na seção 2.2.1 apenas pelo tipo de projeção utilizada, que nesse caso é a perspectiva, tratando-se de um feixe de retas concorrentes no CP e com orientação no espaço dada pelos ângulos de atitude do sensor. As projeções resultantes são denominadas obstruções perspectivas de edifícios. Maiores detalhes a respeito desse assunto podem ser encontrados em Fazan et al. (2006).

As partes das sombras de edifícios que não estão ocultas por obstruções perspectivas (do edifício considerado ou de outros), estarão visíveis na imagem aérea. Geometricamente, a parte visível de uma sombra é obtida através da diferença entre o polígono que a define e os polígonos que representam as obstruções perspectivas. Um exemplo ilustrando como as obstruções perspectivas afetam as projeções de sombra de edifícios pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Obstrução perspectiva de um edifício ocultando parte da sombra produzida por outro edifício.



2.3 Registro das sombras visíveis na imagem aérea

Ao final do processo de obtenção das regiões de sombra visíveis, os contornos que as representam são registrados na imagem aérea correspondente. O registro dos pontos que representam os polígonos das sombras previstas no referencial cartesiano local é realizado empregando-se as equações de colinearidade (WOLF e DEWITT, 2000), através das quais são calculadas as coordenadas desses pontos no referencial fotogramétrico.

Como a imagem aérea real é afetada por erros sistemáticos, é empregado um procedimento que consiste em se introduzir os erros sistemáticos nas coordenadas fotogramétricas que representam os polígonos de sombra, a fim de obter as coordenadas desses pontos no referencial digital da imagem aérea. Em seguida, os contornos dos polígonos registrados na imagem aérea são delineados através da conexão dos pontos que os definem.

É importante lembrar que o registro das sombras na imagem aérea é particularmente útil, pois no referencial digital (C, L) são realizadas as tarefas de

análise de imagem. Assim, uma futura modelagem de informações contextuais poderá ser realizada com base nos elementos obtidos neste referencial.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA DE PREDIÇÃO DE SOMBRAS

Nesta seção são apresentados e discutidos alguns resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia de predição de sombras apresentada neste trabalho. A seguir são brevemente descritos os dados utilizados e a forma de análise dos resultados. Em seguida, é apresentada a descrição e a análise de alguns dos experimentos realizados. Por fim, são discutidos os principais fatores que interferem na qualidade dos resultados fornecidos pelo método proposto.

3.1 Dados utilizados

Para a avaliação experimental da metodologia proposta foram utilizados dados de imagens aéreas de alta resolução na escala 1:10.000 (resolução espacial em torno de 25 cm) da área urbana do município de Curitiba – PR, bem como seus parâmetros de orientação interior. Também foi utilizado um conjunto de pontos de apoio com coordenadas (E, N, H) para a estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens aéreas, através do procedimento fotogramétrico de resseção espacial, além de dados de efemérides solares obtidos a partir do Anuário Astronômico do Observatório Nacional. Os dados obtidos por varredura a laser utilizados neste trabalho compreenderam uma malha irregular de pontos com coordenadas (E, N, H) contendo um total de 8.593.331 pontos e uma imagem de intensidade de retorno do pulso laser, correspondente à região coberta pelas imagens aéreas.

3.2 Formas de análise dos resultados

As formas visual e numérica foram utilizadas para analisar os resultados obtidos nos experimentos realizados. A análise visual consistiu em comparar, na imagem aérea, as projeções dos polígonos de sombra obtidos através do método com os respectivos polígonos de sombra de referência extraídos manualmente a partir da imagem aérea e do MDE/laser.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo uso do método de predição de sombras proposto, os polígonos de sombra preditos foram comparados numericamente com seus respectivos polígonos de sombra de referência. Para tanto, foram utilizados dois indicadores de qualidade, calculados em função das áreas e dos perímetros dos polígonos de sombra preditos e de referência. Esses indicadores mostram, respectivamente, a porcentagem da área e do perímetro de um polígono de sombra predito em relação ao polígono de referência, e são dados por

$$A_p (\%) = \left(\frac{A_p}{A_R} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

e

$$P_p (\%) = \left(\frac{P_p}{P_R} \right) \cdot 100, \quad (12)$$

onde A_R e P_R são, respectivamente, a área e o perímetro de um polígono de sombra de referência e A_p e P_p são as mesmas variáveis, relacionadas ao polígono de sombra predito correspondente.

As Equações 11 e 12 podem produzir valores maiores que 100%, o que indica que o atributo considerado (área e/ou perímetro) calculado para um polígono de sombra predito é maior que o valor obtido para o respectivo polígono de sombra de referência. Para valores abaixo de 100%, a recíproca é verdadeira.

3.3 Aspectos computacionais

As implementações computacionais referentes ao método proposto foram realizadas em linguagem de programação C/C++ utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado Borland C++ Builder 4.

3.4 Resultados experimentais

Para demonstrar a eficácia do método são apresentados três experimentos com diferentes níveis de complexidade. A seguir é apresentada uma descrição detalhada, bem como a análise visual e numérica para cada experimento.

3.4.1 Experimento 1

A Figura 4 mostra os resultados obtidos com o primeiro experimento. Na Figura 4(a) é mostrada a projeção dos limites da via urbana e da parte da sombra projetada pelo edifício que a obstrui. Analisando visualmente a projeção na imagem do polígono de sombra predito, verifica-se que este possui uma área maior que a do polígono de sombra de referência mostrado pela Figura 4(b), o que é comprovado pelos valores de área e perímetro apresentados na Tabela 1, calculados para ambos os polígonos.

A discrepância entre os valores das áreas (predita e de referência) é de 40,772 m² e corresponde à cerca de 650 pixels na imagem área. Já o valor do perímetro do polígono de sombra predito é praticamente idêntico ao do polígono de referência: a discrepância entre os valores dos perímetros é de 0,408 m (pouco significativa comparada à resolução espacial da imagem aérea).

Figura 4 – Visualização dos resultados obtidos no experimento 1:
 (a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.

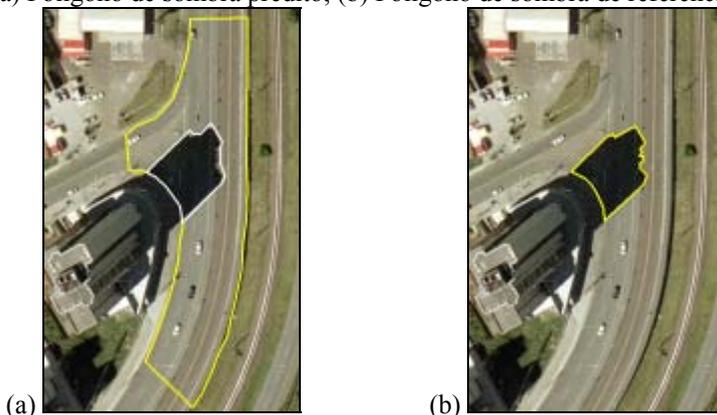


Tabela 1 – Resultados da análise numérica do experimento 1.

Objeto sombra	Área (m ²)	Perímetro (m)
Polígono predito	484,576	94,924
Polígono de referência	443,804	95,332
Indicadores de qualidade	$A_P (\%) = 109,2$	$P_P (\%) = 99,6$

Na Tabela 1 também são apresentados os resultados obtidos na análise numérica do experimento 1. Os indicadores de qualidade mostram que para este experimento a área de sombra predita é 9,2% maior que a área da sombra realmente projetada pelo edifício sobre a via urbana e que o perímetro do polígono de sombra predito é 0,4% menor que o do polígono de referência.

3.4.2 Experimento 2

A Figura 5 mostra o resultado obtido com o segundo experimento. Este experimento envolve a predição das regiões de sombra projetadas sobre a via urbana por mais de um edifício (2 neste caso, identificados pelos números 1 e 2 na Figura 5(a)). Este experimento é mais complexo que o anterior, uma vez que também há a ocorrência de uma obstrução sobre a via urbana, causada pela projeção perspectiva do edifício identificado pelo número 3 na Figura 5(a). Esta obstrução está ocultando algumas partes das sombras projetadas pelos edifícios 1 e 2, conforme pode ser visto ainda nesta mesma figura. Nesses casos, antes da obtenção dos polígonos finais representando as sombras projetadas pelos edifícios no PMHLV, é necessário também obter a região correspondente à obstrução perspectiva que está ocultando

partes das sombras. A partir dessas regiões, são determinadas as partes das sombras projetadas pelos edifícios que estarão visíveis na imagem aérea.

A Figura 5(a) mostra as projeções dos polígonos preditos que representam as partes das sombras projetadas pelos edifícios 1 e 2 sobre o PMHLV que estão visíveis na imagem aérea e a Figura 5(b) mostra as projeções dos polígonos de sombra utilizados como referência na comparação numérica dos resultados.

Figura 5 – Visualização dos resultados obtidos no experimento 2:

(a) Polígonos de sombra preditos; (b) Polígonos de sombra de referência.



Analisando visualmente os resultados obtidos neste experimento, verifica-se que o método funcionou adequadamente, obtendo as partes de sombra visíveis na imagem aérea. Para o caso do edifício 1, o polígono de sombra predito é bastante próximo ao polígono de sombra de referência correspondente, inclusive no que diz respeito aos valores numéricos dos atributos (área e perímetro) apresentados na Tabela 2.

Este fato é comprovado pelos indicadores de qualidade calculados para a comparação numérica do resultado. A discrepância entre as áreas é de $1,152 \text{ m}^2$ (em torno de 18 pixels na imagem aérea), indicando que a área da sombra predita é praticamente idêntica à área da sombra real projetada pelo edifício sobre a via. No caso do perímetro, o valor obtido para o polígono de sombra predito é de $5,804 \text{ m}$ (cerca de 6%) menor que o calculado para o polígono de sombra de referência.

Tabela 2 – Resultados da análise numérica do experimento 2 para a sombra produzida pelo edifício 1.

Objeto sombra 1	Área (m^2)	Perímetro (m)
Polígono predito	346,135	89,275
Polígono de referência	344,983	95,079
Indicadores de qualidade	$A_p (\%) = 100,3$	$P_p (\%) = 93,9$

No que se refere à sombra projetada pelo edifício 2 sobre o PMHLV, a área e o perímetro do polígono predito, cujos valores são apresentados na Tabela 3, diferem bastante dos valores de referência. Os indicadores de qualidade mostram que a sombra projetada sobre a via pelo edifício 2 compreende uma área cerca de 4 vezes maior que a do polígono predito pelo método proposto. Já o perímetro do polígono em questão corresponde a cerca de 50% do contorno da sombra real visível na imagem aérea. Este resultado é difícil de verificar visualmente comparando-se as Figuras 5(a) e 5(b), uma vez que a área de sombra real projetada pelo edifício 2 sobre a via é composta por aproximadamente 155 pixels na imagem aérea.

Tabela 3 – Resultados da análise numérica do experimento 2 para a sombra produzida pelo edifício 2.

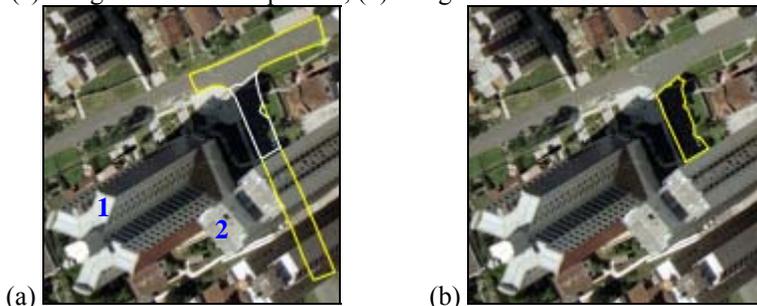
Objeto sombra 2	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	2,351	7,700
Polígono de referência	9,692	15,848
Indicadores de qualidade	A_p (%) = 24,3	P_p (%) = 48,6

3.4.3 Experimento 3

A Figura 6(a) mostra o resultado obtido com o terceiro experimento. Neste caso, existe uma sombra projetada sobre o PMHLV pelo edifício identificado pelo número 1 com uma parte obstruída pela projeção perspectiva do edifício identificado pelo número 2. A Figura 6(b) mostra a projeção do polígono de sombra de referência utilizado na comparação numérica do resultado.

Figura 6 – Visualização dos resultados obtidos no experimento 3:

(a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.



Analisando visualmente as projeções na imagem aérea, é possível verificar que o método obteve um polígono representando a sombra projetada pelo edifício sobre a via urbana bastante coerente com a região afetada pelo sombreamento na imagem aérea. Os valores dos atributos área e perímetro para os polígonos predito e de referência, bem como dos indicadores de qualidade calculados através das Equações 11 e 12, são apresentados na Tabela 4. Os indicadores de qualidade mostram que o polígono de sombra predito é bastante próximo à sombra real visível na imagem aérea, uma vez que esse apresenta área 2,8% e perímetro 0,8% menores que o polígono de referência. Estas porcentagens representam discrepâncias de 6,504 m² (em torno de 104 pixels) para a área e 0,637 m para o perímetro.

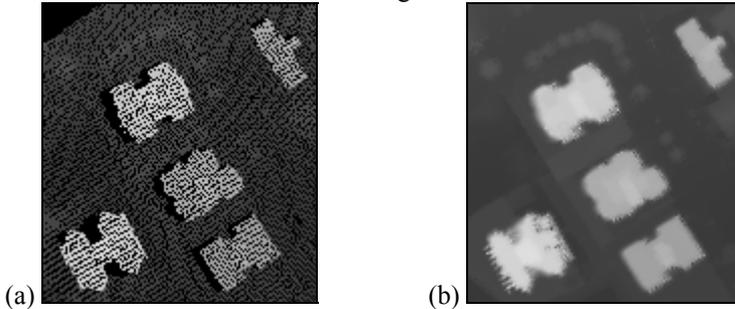
Tabela 4 – Resultados da análise numérica do experimento 3.

Objeto sombra	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	223,232	78,447
Polígono de referência	229,736	79,084
Indicadores de qualidade	A _p (%) = 97,2	P _p (%) = 99,2

3.5 Discussão dos principais fatores que afetam a qualidade dos resultados

Existem cinco fatores principais que interferem na qualidade das sombras de edifícios obtidas pelo método proposto neste trabalho. O primeiro deles é o que mais influencia o resultado final de um contorno de sombra predito e está relacionado à baixa definição dos limites dos telhados dos edifícios, principalmente dos mais altos, em um MDE derivado de dados de varredura a laser. Isso em geral dificulta o delineamento dos contornos dos telhados dos edifícios a partir da imagem altimétrica obtida pela transformação do MDE/laser. Esse fato está diretamente relacionado ao modelo de varredura, que depende principalmente do tipo de espelho empregado pelo sistema utilizado. Dependendo do modelo de varredura do sistema, podem ocorrer perdas durante a aquisição dos dados, resultando em regiões sem pontos sobre a superfície sendo levantada. De fato, isso pode ser visualizado na Figura 7(a), que mostra um recorte de uma imagem altimétrica gerada diretamente a partir da malha irregular de pontos utilizada na obtenção do MDE/laser utilizado neste trabalho. Essa malha foi coletada por um sistema cujo espelho utiliza o modelo de varredura ziguezague.

Figura 7 – Região de uma imagem altimétrica gerada a partir de: (a) malha irregular de pontos obtidos por varredura a laser; (b) MDE produzido por interpolação da malha irregular.



Na imagem mostrada na Figura 7(a) é possível notar algumas regiões da superfície, adjacentes aos edifícios, onde ocorreram perdas de dados durante a varredura. Para a produção do MDE, a malha irregular de pontos passa por um processo de interpolação para gerar uma grade regular, o que introduz erros (de interpolação) no modelo produzido e, além disso, insere informações nas regiões onde originalmente não existem dados. Isto pode ser observado na Figura 7(b), onde é mostrada a região correspondente a da imagem mostrada na Figura 7(a), agora obtida a partir do MDE/laser. Na Figura 7(b) é possível verificar que o processo de interpolação introduziu informações em regiões onde não existiam dados na superfície original, degradando a acurácia dos limites dos contornos dos telhados de edifícios mostrados nesse exemplo.

O segundo fator que interfere na qualidade (principalmente na área e no perímetro) de um contorno de sombra obtido pelo método proposto neste trabalho está relacionado ao valor de altura tomada para cada edifício. Na extração manual do contorno do telhado de um edifício, a altura do mesmo é calculada em função da diferença entre a altitude média do telhado, estimada com base em alguns valores de brilho observados sobre o telhado, e da altitude do plano médio da via adjacente ao edifício. A imagem altimétrica produzida com base no MDE, a partir da qual são obtidos os contornos dos telhados e as altitudes médias dos edifícios, é afetada pelos erros de interpolação do MDE, que são propagados para a imagem altimétrica no procedimento de transformação descrito na Seção 2.1.1. No referido procedimento, os valores de brilho da imagem são calculados em função das altitudes dos pontos da superfície do MDE, através da Equação 5, desprezando-se a parte decimal do resultado. Isso implica em dizer que a altura estimada para um edifício é sempre um valor aproximado. Em termos práticos, isso significa que se o valor médio de altura de um edifício for maior que o valor real, o polígono de sombra predito possuirá uma área maior que a sombra real projetada pelo edifício sobre a via (sombra de referência) e vice-versa.

O terceiro fator que interfere na qualidade das sombras preditas com o uso do método proposto está relacionado à qualidade dos parâmetros de orientação exterior da imagem aérea. A explicação para isto é que eventuais obstruções perspectivas podem ocultar partes das sombras visíveis na imagem aérea, conforme foi mencionado na Seção 2.2.3. Como as obstruções perspectivas dependem dos parâmetros de orientação exterior, a qualidade destes afeta diretamente a predição de ocorrências dessas obstruções e, conseqüentemente, afeta a qualidade das sombras preditas que possuem partes ocultas por obstruções perspectivas.

O quarto fator que influencia a qualidade de uma sombra predita é a acurácia da definição dos limites da via adjacente ao edifício considerado, uma vez que o polígono predito corresponde à parte da sombra do edifício que se projeta sobre a via. De qualquer forma, a delimitação acurada dos limites das vias é garantida pelo uso da imagem de intensidade de retorno do pulso laser, na qual as vias urbanas construídas com pavimentação convencional (asfalto) aparecem bem definidas.

O quinto e último fator que interfere na qualidade das sombras preditas está relacionado à posição (orientação) do Sol, que é estimada com base no instante (hora local) de tomada da imagem. Isso ocorre porque a projeção das sombras depende do azimute e da altura solar: o azimute solar interfere na orientação da projeção de sombra e a altura solar interfere na área total da sombra projetada.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De maneira geral, os resultados alcançados nos experimentos realizados evidenciam a potencialidade do método descrito neste trabalho e o qualificam para ser utilizado na predição de elementos contextuais de sombra de edifícios, para futuras aplicações em processos de análise de imagem de alto nível, como a modelagem contextual referente a obstruções provocadas pela projeção de sombras de edifícios sobre vias urbanas. A modelagem contextual obtida através dos elementos fornecidos por esta metodologia poderá ser aplicada, por exemplo, em métodos para a extração automática de edifícios e da malha viária em ambientes urbanos complexos.

Tendo em vista as potencialidades da metodologia em problemas de análise de imagem, esforços deverão ser feitos no sentido de automatizar a extração dos limites de vias urbanas e dos contornos dos telhados dos edifícios, de modo a tornar o método proposto totalmente automático. Para tanto, futuramente poderão ser utilizados métodos automáticos para extrair diretamente os contornos de telhados de edifícios a partir do MDE/laser e os limites das vias urbanas a partir da imagem de intensidade de retorno do pulso laser (que é atualmente empregada na extração manual dos limites das vias). Outra sugestão para trabalhos futuros é realizar um estudo mais aprofundado, de modo a quantificar os fatores (discutidos na Seção 3.5) que interferem na qualidade dos resultados fornecidos pela metodologia proposta neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAUMGARTNER, A. et al. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 65, n. 7, p. 777-785, 1999.
- ECKSTEIN, W.; STEGER, C. Fusion of digital terrain models and texture for object extraction. In: SECOND INTERNATIONAL AIRBORNE REMOTE SENSING CONFERENCE AND EXHIBITION, 1996, Michigan – EUA. *Proceedings...* Michigan – EUA, p. 1-10.
- FAZAN, A. J. *Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em um modelo digital de elevações e dados de imagens aéreas de alta resolução*. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.
- FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P.; GALVANIN, E. A. S. Extração de obstruções perspectivas de edifícios ao longo de vias urbanas. *Revista Pesquisa em Geociências*, Porto Alegre, v. 33, n. 2, p. 101-108, 2006.
- GWINNER, K.; SCHAALÉ, M. A case study on the influence of shadows and shading on multispectral airborne imaging data. In: THIRD INTERNATIONAL AIRBORNE REMOTE SENSING CONFERENCE AND EXHIBITION, 1997, Copenhagen – Denmark. *Proceedings...* Copenhagen – Denmark.
- HINZ, S. et al. Road extraction focussing on urban areas. In: AUTOMATIC EXTRACTION OF MAN-MADE OBJECTS FROM AERIAL AND SPACE IMAGES, 2001, Rotterdam – Netherlands. *Proceedings...* Rotterdam – Netherlands, p. 255-265.
- HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Road extraction in urban areas supported by context objects. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, v. 33, 2000, Amsterdam – Netherlands. *Proceedings...* Amsterdam – Netherlands, p. 163-168.
- HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Urban road net extraction integrating internal evaluation models. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 2002, Graz – Austria. *Proceedings...* Graz – Austria, v. 1, p. 163-168.
- LI, Y.; SASAGAWA, T.; GONG, P. A system of the shadow detection and shadow removal for high resolution city aerial photo. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, v. 35 (B3), 2004, Istanbul – Turkey. *Proceedings...* Istanbul – Turkey, p. 802-807.
- MADHAVAN, B. B. et al. Automatic extraction of shadow regions in high-resolution ADS40 images - By robust approach of feature spaces analysis. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, v. 35 (B3), 2004, Istanbul – Turkey. *Proceedings...* Istanbul – Turkey, p. 808-810.

- MASSALABI, A.; HE, D. -C.; BÉNIÉ et ÉRIC BEAUDRY, G. B. Restitution of information under shadow in remote sensing high space resolution images: Application to IKONOS data of Sherbrooke City. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, v. 35 (B3), 2004, Istambul – Turkey. *Proceedings...* Istambul – Turkey, p. 173-178.
- MUELLER, I. I. *Spherical and practical Astronomy: as applied to Geodesy*. 2ª ed. New York: Frederick Ungar, 1977. 615 p.
- POLIDORIO, A. M. et al. Automatic shadow segmentation in aerial color images. In: XVI BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 2003, São Carlos – Brazil. *Proceedings...* São Carlos - Brazil, p. 270-277.
- PRATI, A. et al. Shadow detection algorithms for traffic flow analysis: a comparative study. In: IEEE 4TH INTERNATIONAL IEEE CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2001, San Francisco – USA. *Proceedings...* San Francisco – USA , p. 340-345.
- PRICE, K. Urban street grid description and verification. In: IEEE WORKSHOP ON COMPUTER VISION, 2000, Palm Springs – USA. *Proceedings...* Palm Springs – USA, p. 148-154.
- SANTOS, D. R.; DALMOLIN, Q.; BASSO, M. A. Detecção automática de sombras em imagens de alta resolução. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 87-99, 2006.
- SUZUKI, A. et al. Dynamic shadow compensation of aerial images based on color and spatial analysis. In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION (ICPR'00), 2000, Barcelona – Espanha. *Proceedings...* Barcelona – Espanha, p. 1313-1320.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry: with applications in GIS*. 3ª ed. Boston: McGraw-Hill, 2000, 608 p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita da UFPR – Universidade Federal do Paraná, pela cessão das imagens aéreas e dos pontos de apoio utilizados neste trabalho. Os agradecimentos se estendem também ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, pelo fornecimento dos dados de varredura a laser (malha de pontos e imagem de intensidade), empregados na avaliação experimental da metodologia proposta. Finalmente, os autores agradecem ao CNPq, pela concessão de bolsa de Mestrado que possibilitou a realização deste trabalho.

(Recebido em dez/07. Aceito em jul/08).