

# COMPENSAÇÃO DE SOMBRAS DE EDIFÍCIOS USANDO IMAGENS AÉREAS DE ALTA RESOLUÇÃO E DADOS DE VARREDURA A LASER

*Compensation of Building Shadows using High-resolution Aerial Imagery and Airborne Laser Scanning Data*

**Antonio Juliano Fazan<sup>1</sup>**  
**Aluir Porfírio Dal Poz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> **Universidade Estadual Paulista – UNESP**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**  
Rua Roberto Simonsen, 305- CP 468 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP  
ajfazan@gmail.com

<sup>2</sup> **Universidade Estadual Paulista – UNESP**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Departamento de Cartografia**  
Rua Roberto Simonsen, 305- CP 468 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP  
aluir@fct.unesp.br

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um método para prever e compensar sombras de edifícios presentes em imagens aéreas de alta resolução de cenas urbanas complexas. Áreas sombreadas são muito comuns, principalmente em imagens de alta resolução e produzem efeitos negativos que afetam as técnicas convencionais de análise de imagens. O método proposto consiste em quatro etapas sequenciais. Primeiro, os contornos de telhados de edifícios são extraídos manualmente a partir de uma imagem de intensidade gerada através da normalização de um modelo digital de superfície derivado de dados de varredura a laser (MDS/laser). Segundo, estes contornos são projetados sobre um plano médio local através das projeções ortogonal e paralela. A direção das retas de projeção paralela é calculada com base no azimute e na elevação solar estimados para o instante de aquisição da imagem aérea. O resultado desta etapa são dois polígonos: um representando a base do edifício e outro a projeção paralela do contorno do telhado para o plano médio local. A combinação dos polígonos através de operações booleanas resulta em uma região que compreende a sombra projetada pelo edifício. Na etapa 3, esta região é registrada na imagem aérea, na qual um procedimento para compensar o efeito do sombreadamento é aplicado (etapa 4). Este procedimento inclui limiarização, rotulação dos pixels de sombra e dos pixels de áreas de referência (vizinhas às áreas de sombra), análise do histograma de ambas as áreas e mapeamento de intensidades. As áreas de referência fornecem as informações necessárias ao mapeamento de intensidades utilizado para compensar as áreas de sombra. Os resultados obtidos na avaliação experimental indicam que o método trabalha adequadamente, uma vez que houve uma significativa melhora na aparência visual das áreas afetadas por sombras de edifícios na imagem aérea.

**Palavras chave:** Sombras de Edifícios, Imagens Aéreas, Dados de Varredura a Laser, Projeção Paralela.

## ABSTRACT

In this paper a methodology for prediction and compensation of building shadows cast on high-resolution aerial imagery taken from complex urban scenes is presented. Shadowed areas are very common, mainly in high-resolution imagery and cause negative effects that disturb conventional techniques of image analysis. The proposed method consists in four sequential steps. First, the building roof contours are manually extracted from a gray level image generated by the normalization of a digital surface model, which is derived from airborne laser scanning data (DSM/laser). Second, the building roof contours are projected onto a local mean plane by using orthogonal and parallel projection. The direction of the parallel straight lines is derived from the solar ray attitudes (azimuth and elevation), which are computed for the acquisition time of the aerial image. The results of this step are two polygons: one

representing the building bottom and another one representing the parallel projected building roof. Then, these two polygons are combined to give a region containing the shadow cast by a particular building. Finally, this region is registered onto the image plane (3<sup>rd</sup> step), in which a procedure for compensation of shadowing effects is applied (4<sup>th</sup> step). This procedure includes thresholding, shadow area and companion area (bright areas neighboring shadow regions) labeling, histogram analysis of both areas and intensity mapping. Companion areas supply information used in the intensity mapping for compensating shadow areas. Results obtained in the experimental evaluation of the proposed method showed that it works properly, since it allowed a significant improvement of visual appearance of regions affected by shadows cast by buildings on the aerial image.

**Keywords:** Building Shadows, Aerial Imagery, Airborne Laser Scanning Data, Parallel Projection.

## 1. INTRODUÇÃO

A principal razão para a ocorrência de sombras em imagens aéreas de alta resolução é o bloqueio direto da luz solar por objetos altos como edifícios e árvores. As superfícies afetadas por sombreamento são fracamente iluminadas e geralmente aparecem escuras nas imagens. Do ponto de vista geométrico, a forma e a área de uma sombra dependem de fatores como o azimute e a elevação solar no instante de imageamento bem como de parâmetros como a forma e as dimensões (principalmente da altura) do objeto que a produz, além da posição e orientação espacial do sensor no instante de aquisição da imagem (MASSALABI *et al.*, 2004).

Os efeitos negativos causados pelas sombras aumentam com a resolução espacial da imagem. As sombras modificam a resposta espectral dos objetos imageados e afetam drasticamente o desempenho das técnicas convencionais de análise, devido à obstrução parcial ou total das feições na imagem. Por exemplo, em aplicações como a detecção de alterações cadastrais ou correspondência automática de imagens, as sombras provocadas por edifícios altos e árvores interferem na análise, produzindo resultados incorretos (MASSALABI *et al.*, 2004).

Na literatura especializada é possível encontrar diversos métodos para detecção e/ou compensação de sombras, que podem ser classificados, de acordo com o tipo de dado utilizado, em dois grupos principais. O primeiro deles utiliza basicamente técnicas convencionais de análise (p.ex. limiarização, segmentação etc.) para detectar as sombras presentes nas imagens.

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. As características mais comumente exploradas em análise de imagem para detectar regiões de sombras ou compensar seus efeitos negativos são (MASSALABI *et al.*, 2004):

- Sombras são regiões formadas por *pixels* com baixo valor de intensidade;

- A forma de uma sombra é função da forma do objeto que a produz;
- Uma ou mais extremidades de uma região sombreada são orientadas na direção do azimute solar (para o instante de tomada da imagem);
- A área de uma sombra depende da altura solar (para o instante de tomada da imagem) e da altura do objeto que a produz;
- A projeção de uma sombra não modifica a saturação da cor de um objeto;
- A textura de uma superfície praticamente não é afetada por sombreamento.

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. Em outra estratégia, Salvador *et al.* (2001) utilizam propriedades invariantes de cores como a saturação para discriminar as regiões sombreadas presentes em imagens digitais coloridas. 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.

O segundo grupo emprega dados de múltiplas fontes para prever a ocorrência de sombras e/ou compensar seus efeitos negativos nas imagens. Basicamente são utilizados dados de imagem combinados com informações solares e de altura dos objetos (geralmente derivadas de um modelo digital de superfície – MDS). Um exemplo é o método proposto por Eckstein e Steger (1996), no qual as regiões de sombra presentes em uma imagem são inicialmente preditas a partir de um MDS e de informações referentes à posição solar no instante de tomada da imagem, sendo refinadas posteriormente através de segmentação, limiarização e crescimento de regiões.

Fazan (2007) e Fazan e Dal Poz (2008) apresentam um método para a predição de regiões afetadas por sombras de edifícios em uma imagem aérea. Contornos de telhado de edifícios obtidos a partir

de um MDS/laser são utilizados juntamente com informações sobre a posição solar no instante de aquisição da imagem como base para a obtenção das regiões de sombra, que posteriormente são registradas na imagem aérea.

Neste trabalho, um método para predição e compensação de sombras causadas por edifícios altos em imagens aéreas de alta resolução é apresentado. O método proposto utiliza dados de varredura a laser e informações de efemérides solares combinados com dados das imagens para prever e compensar os efeitos negativos causados pelas sombras projetadas por edifícios. Trata-se de uma extensão de um método proposto em Fazan e Dal Poz (2008) para predição de sombras em imagens aéreas de alta resolução.

## 2. METODOLOGIA

O método proposto para prever e compensar sombras de edifícios em imagens aéreas de alta resolução é baseado em 4 etapas principais:

- **Obtenção de contornos de telhado de edifícios:** Esta etapa consiste em identificar visualmente e extrair manualmente os contornos de telhado de edifícios a partir de uma imagem de intensidade gerada através da normalização de um MDS/laser;
- **Predição de sombras de edifícios:** Nesta etapa, é obtido um conjunto de polígonos tridimensionais que delimitam as áreas afetadas pelas sombras projetadas pelos edifícios na imagem aérea. Os vértices de cada polígono são referidos a um sistema de coordenadas local. No início, cada edifício é tratado como um sólido regular. A intersecção entre este sólido e um plano médio horizontal local (PMHL) define o contorno da base do edifício ( $C_B$ ). Na sequência, o contorno do telhado do edifício é projetado ( $C_P$ ) sobre o PMHL através da projeção paralela, cuja orientação espacial das retas é derivada do azimute e elevação solar, calculados para o instante de aquisição da imagem, a partir de dados de efemérides solares. Ao final, o polígono delimitando a sombra projetada por um edifício é obtido através da combinação de  $C_B$  e  $C_P$ ;
- **Registro das sombras na imagem aérea:** Esta etapa consiste em registrar na imagem aérea os polígonos delimitadores de sombras obtidos na etapa 2. O registro é baseado nas equações de colinearidade e em um procedimento de orientação interior “inversa”;
- **Compensação das sombras na imagem aérea:** Nesta etapa, a intensidade dos pixels afetados por sombreamento é

restaurada com base na intensidade de pixels pertencentes a áreas de referência, a fim de compensar o efeito negativo causado pela projeção da sombra na imagem.

A Fig. 1 ilustra o fluxograma do método proposto neste trabalho.

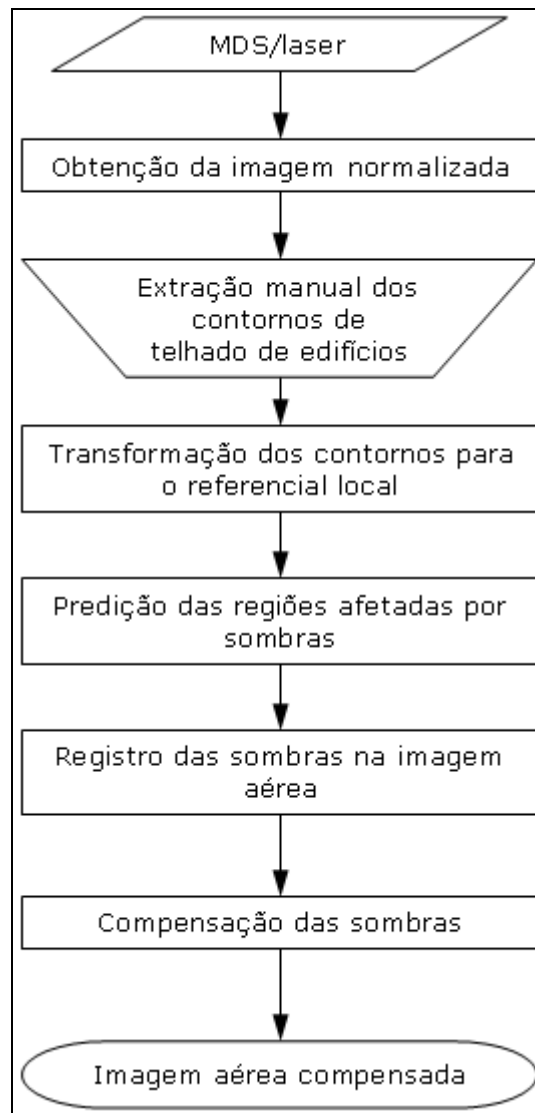


Fig. 1 – Fluxograma do método proposto.

### 2.1. Obtenção dos contornos de telhado dos edifícios

#### 2.1.1. Obtenção da imagem normalizada

Para identificar visualmente e extrair manualmente os contornos de telhado dos edifícios a partir de um MDS/laser, este é transformado em uma imagem de intensidade digital, na qual os valores de brilho dos pixels são proporcionais às alturas dos pontos no MDS/laser. Em última análise, este é um procedimento de normalização aplicado às coordenadas dos pontos do modelo, que é realizado em dois estágios.

Primeiramente, as dimensões da imagem (largura e altura) são calculadas através das equações

$$w = (E_{\max} - E_{\min}) / GSD \quad (1)$$

e

$$h = (N_{\max} - N_{\min}) / GSD, \quad (2)$$

nas quais:

- $(E_{\min}, N_{\min})$  são as coordenadas planimétricas do canto inferior esquerdo do retângulo que delimita o MDS/laser;
- $(E_{\max}, N_{\max})$  são as coordenadas planimétricas do canto superior direito do retângulo que delimita o MDS/laser
- $GSD$  é a resolução espacial da imagem no terreno.

Com base nas dimensões calculadas, uma imagem digital é gerada. No segundo estágio desta etapa, as coordenadas planimétricas  $(E_k, N_k)$  dos pontos do MDS/laser são mapeadas para suas posições correspondentes em pixels – coordenadas  $(C_k, L_k)$  – na imagem normalizada. Este procedimento é realizado aplicando-se as equações

$$C_k = (E_k - E_{\min}) / GSD \quad (3)$$

e

$$L_k = (N_{\max} - N_k) / GSD, \quad (4)$$

nas quais  $(E_{\min}, N_{\max})$  são as coordenadas planimétricas do canto superior esquerdo do retângulo que delimita o MDS/laser.

O valor de brilho associado ao pixel  $(C_k, L_k)$  é calculado através da equação

$$ND_k = \frac{255}{H_{\max} - H_{\min}} (H_k - H_{\min}), \quad (5)$$

na qual  $H_{\min}$  e  $H_{\max}$  representam, respectivamente, as altitudes dos pontos de menor e maior altura no MDS/laser e  $H_k$  é a altitude do ponto de coordenadas planimétricas  $(E_k, N_k)$ .

O procedimento descrito anteriormente produz uma imagem de intensidade digital com resolução radiométrica de 8 bits (256 níveis de cinza), na qual os valores de brilho são escalados no intervalo 0 – 255. O menor valor de brilho corresponde ao ponto no MDS/laser com altitude igual a  $H_{\min}$  e o maior a pontos com altitude igual à  $H_{\max}$ .

Uma vantagem do procedimento de transformação do MDS/laser em imagem de intensidade

é a possibilidade de se obter coordenadas  $(E, N, H)$  a partir de coordenadas  $(C, L, ND)$  de pixels observados na imagem normalizada. Este procedimento é realizado através da inversa da transformação do MDS/laser para a imagem normalizada, cujos detalhes são dados na sequência.

### 2.1.2. Extração manual dos contornos de telhado dos edifícios

Após a transformação do MDS/laser em imagem de intensidade, é possível extrair contornos de telhado de edifícios a partir da imagem resultante. Este procedimento é realizado a partir da identificação visual e extração manual de coordenadas  $(C, L, ND)$  de pontos que definem os contornos que envolvem os telhados dos edifícios na imagem, conforme mostra a Fig. 2.

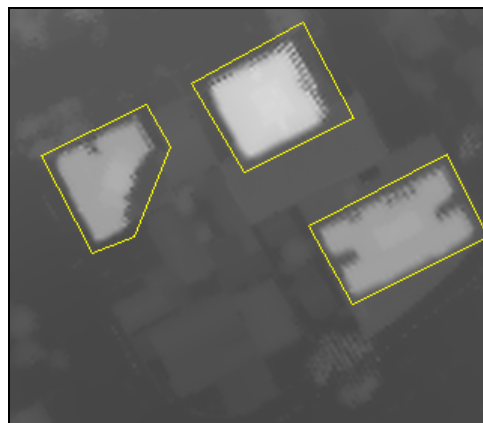


Fig. 2 – Extração de contornos de telhado de edifícios a partir da imagem de intensidade normalizada.

As coordenadas  $(C, L, ND)$  dos pontos medidos devem ser transformadas para um sistema local de coordenadas cartesianas (SLCC), antes da execução do procedimento de predição e compensação das áreas sombreadas. A Fig. 3 ilustra a sequência de transformações a ser aplicada às coordenadas  $(C, L, ND)$  para se obter coordenadas  $(X_L, Y_L, Z_L)$  referidas ao SLCC.

$$\boxed{(C, L, ND) \rightarrow (E, N, H) \rightarrow (\phi, \lambda, h) \rightarrow (X, Y, Z) \rightarrow (X_L, Y_L, Z_L)}$$

Fig. 3 – Sequência de transformações aplicada aos pontos que definem o contorno de telhado de um edifício.

As transformações de coordenadas  $(E, N, H) \rightarrow (\phi, \lambda, h) \rightarrow (X, Y, Z) \rightarrow (X_L, Y_L, Z_L)$  são bem conhecidas na literatura especializada e, portanto, não são apresentadas aqui. Já a transformação  $(C, L, ND) \rightarrow (E, N, H)$  é dada pelas equações

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

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

$$H = H_{\min} + \frac{ND}{255}(H_{\max} - H_{\min}), \quad (8)$$

que correspondem à inversa da transformação do MDS/laser para a imagem normalizada.

## 2.2. Predição das regiões afetadas por sombras de edifícios

Nesta etapa, as regiões afetadas pela projeção das sombras de edifícios são obtidas. Primeiramente, os pontos representando o contorno de telhado de um edifício são projetados ortogonalmente no plano médio horizontal local (PMHL), resultando em um contorno contendo a base do respectivo edifício. Para realizar esta projeção ortogonal, é necessária a altura do edifício, cujo valor é obtido a partir da diferença entre a altura do contorno de telhado ( $Z_L^R$ ) e a altura do PMHL ( $Z_L^{PMHL}$ ).

Na sequência, os pontos do contorno de telhado são novamente projetados no PMHL, agora através da projeção paralela. A razão para o uso desta projeção na obtenção das áreas sombreadas é que o centro de projeção – para sombras – é relacionado à posição do Sol, e por este se encontrar muito distante da superfície de projeção (superfície física terrestre), pode ser considerado como sendo posicionado no infinito. As retas de projeção paralela são definidas em função da altura do edifício e da posição solar em um sistema de coordenadas compatível com o referencial cartesiano local, dada pelo azimute ( $A$ ) e elevação ( $h$ ), que são as coordenadas de um astro no sistema astronômico horizontal. Estas coordenadas são calculadas para o instante de aquisição da imagem aérea, a partir de dados obtidos de efemérides solares. Maiores detalhes podem ser obtidos em Fazan (2007). A projeção paralela dos pontos que definem contornos de telhado de edifícios é dada pelas equações

$$X_L^{PMHL} = X_L^R - \Delta Z \frac{\cos(A)}{\operatorname{tg}(h)} \quad (9)$$

e

$$Y_L^{PMHL} = Y_L^R - \Delta Z \frac{\operatorname{sen}(A)}{\operatorname{tg}(h)}, \quad (10)$$

nas quais:

- $(X_L^R, Y_L^R)$  são as coordenadas planimétricas de um ponto pertencente ao contorno de telhado de um edifício;

- $(X_L^{PMHL}, Y_L^{PMHL})$  são as coordenadas  $(X_L^R, Y_L^R)$  projetadas no PMHL;

- $\Delta Z$  é a altura do edifício, dada pela equação

$$\Delta Z = Z_L^R - Z_L^{PMHL}. \quad (11)$$

As equações 9 e 10 não são definidas para  $h = 0^\circ$  (nascer e ocaso do Sol) nem para  $h = 90^\circ$  (quando o Sol passa pelo semimeridiano superior local), o que significa que nestes instantes é esperado que não haja projeções de sombras.

A projeção paralela do contorno de telhado de um edifício resulta em um polígono 3D. A combinação deste polígono com aquele que representa o contorno que envolve a base do mesmo edifício – através de operações booleanas – resulta em um polígono que delimita a região afetada pela projeção de sombra deste edifício.

## 2.3. Registro das regiões de sombra na imagem aérea

Após a etapa de predição das regiões afetadas por sombras, os polígonos que as representam são registrados na imagem aérea através das equações de colinearidade e de um procedimento de orientação interior “inversa”.

Nesta etapa, os parâmetros de orientação interior (OI) e de orientação exterior (OE) da imagem aérea devem estar disponíveis. Os parâmetros de OI podem ser obtidos a partir do certificado de calibração da câmara utilizada na aquisição das imagens. Já os parâmetros de OE podem ser derivados, por exemplo, através de uma resseção espacial por colinearidade (WOLF e DEWITT, 2000; MIKHAIL *et al.*, 2001).

As equações de colinearidade são utilizadas para calcular coordenadas fotogramétricas  $(x, y)$  para os pontos 3D do polígono que delimita a área de sombra projetada por um edifício. O procedimento de orientação interior “inversa” consiste em adicionar os efeitos sistemáticos inerentes ao processo de imageamento a essas coordenadas. Ao final desta etapa, são obtidas coordenadas  $(C, L)$  no referencial digital, que representam o polígono de sombra na imagem aérea.

Os polígonos de sombra registrados na imagem aérea constituem regiões de interesse (RI). Cada RI é formada por dois conjuntos de pixels: um contendo pixels afetados por sombreamento e outro contendo pixels livres desse efeito. Com base em informações derivadas desses dois conjuntos, é aplicado um procedimento para compensar a intensidade dos pixels sombreados.

## 2.4. Compensação das regiões sombreadas na imagem aérea

As regiões de interesse determinadas na etapa anterior permitem aplicar um procedimento de compensação, de modo a reduzir os efeitos de sombreamento na imagem. Para este propósito, técnicas de processamento digital são utilizadas.

De acordo com Li *et al.* (2004), as intensidades de pixels sombreados podem ser restauradas a partir de seu mapeamento para intensidades de pixels referentes ao mesmo tipo de objeto que estejam livres desse efeito indesejado. Esse procedimento de compensação é denominado mapeamento de intensidades a partir de áreas de referência e compreende dois estágios principais. O primeiro é a identificação da área de referência para uma sombra particular, que é definida pelo conjunto de pixels de uma RI livres do efeito de sombreamento. Os demais pixels da RI definem a área de sombra. O segundo é a obtenção de informações dessas duas áreas, que são utilizadas para compensar as intensidades dos pixels afetados pelo sombreamento.

### 2.4.1. Obtenção das áreas de referência

Uma região registrada na imagem que envolve a sombra projetada por um edifício contém pixels sombreados e pixels livres do efeito de sombreamento. A área de referência requerida para o mapeamento de intensidades é definida por estes pixels, que compõem a vizinhança dos pixels sombreados.

A separação desses dois conjuntos de pixels que definem uma região de interesse registrada na imagem é realizada através de uma limiarização, cujo limiar é derivado da análise do histograma de intensidades de uma RI. A limiarização separa os pixels de uma RI em dois conjuntos distintos: o primeiro contém os pixels afetados pelo sombreamento e o segundo define a área utilizada como referência para a compensação das intensidades dos pixels sombreados.

### 2.4.2. Mapeamento de intensidades

O procedimento de mapeamento de intensidades para compensar o efeito de sombreamento utilizado neste trabalho é baseado na análise do histograma de uma área de sombra particular e de sua área de referência correspondente. Os limites inferior e superior de cada histograma são utilizados no mapeamento, que é realizado através da equação

$$M = \left( \frac{m-l}{u-l} \right) (U-L) + L, \quad (12)$$

na qual:

- $m$  é a intensidade de um pixel afetado por sombreamento (antes do mapeamento);
- $M$  é a intensidade do mesmo pixel (após o mapeamento);

- $u$  e  $l$  são, respectivamente, os limites superior e inferior do histograma referente aos pixels que compõem a área de sombra;
- $U$  e  $L$  são, respectivamente, os limites superior e inferior do histograma referente aos pixels que compõem a área de referência.

O procedimento descrito mapeia a intensidade de pixels compreendida entre os limites inferior e superior do histograma da área de sombra para intensidades correspondentes compreendidas entre os limites inferior e superior do histograma da área de referência.

## 3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Para avaliar experimentalmente o método proposto, foi utilizada uma imagem aérea de alta resolução e seus parâmetros de orientação interior. Adicionalmente, um conjunto de pontos de apoio com coordenadas  $(E, N, H)$  foi empregado para estimar os parâmetros de orientação exterior dessa imagem, através de uma resseção espacial por colinearidade. Os dados de varredura a laser utilizados compreendem uma malha irregular de pontos, a partir da qual um MDS foi gerado através da interpolação da malha irregular para uma grade regular. Por fim, os dados de efemérides solares utilizados foram obtidos junto ao Anuário Astronômico do Observatório Nacional.

Para verificar o desempenho do método proposto neste trabalho, foram realizados alguns experimentos, dos quais 2 são descritos a seguir. A Fig. 4 mostra o resultado obtido no primeiro experimento realizado. O recorte da imagem aérea original em (a) mostra a área de sombra projetada por um edifício alto. O resultado obtido após a aplicação do método é mostrado em (b), onde é possível verificar que a área sombreada foi razoavelmente restaurada. No caso deste experimento, as áreas de sombra e de referência são compostas, em sua maior parte, pelo mesmo tipo de cobertura do terreno. Isto contribuiu para a obtenção de uma aparência visual mais uniforme da área restaurada, pois a variabilidade de ambas as áreas é praticamente similar.



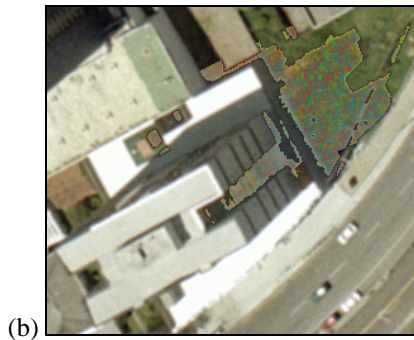


Fig. 4 – Área afetada pela projeção de sombra de um edifício (a); Área sombreada após a aplicação do procedimento de compensação (b).

A Fig. 5 ilustra o resultado obtido no segundo experimento realizado. Tal como no primeiro experimento, o recorte da imagem aérea original em (a) mostra a área afetada pela projeção de sombra de um edifício alto e o recorte em (b) o resultado obtido após a aplicação do método de compensação. O resultado obtido neste experimento foi inferior ao obtido no primeiro; entretanto, em algumas áreas (p.ex. no telhado em destaque no recorte da imagem) o procedimento de compensação apresentou um bom resultado, realçando a informação existente sob a área sombreada. No caso deste experimento, as áreas de sombra e de referência são compostas por diferentes tipos de cobertura da terra, o que contribuiu para diminuir o desempenho do procedimento de compensação e degradar a qualidade visual da área restaurada. Isto demonstra que o método de compensação é sensível à variabilidade de alvos existentes em uma dada área. Para contornar este problema, uma possível solução seria dividir as áreas de sombra em classes (de acordo com o tipo de alvo sombreado) e então utilizar no procedimento de compensação áreas de referência derivadas manualmente (compostas por pixels correspondentemente às classes de sombra).



(a)



(b)

Fig. 5 – Área afetada pela projeção de sombra de um edifício (a); Área sombreada após a aplicação do procedimento de compensação (b).

A partir da análise dos resultados obtidos nos experimentos realizados, foi possível concluir que o desempenho do procedimento de compensação de sombras é fortemente influenciado pela qualidade radiométrica da imagem aérea utilizada. A remoção prévia de ruídos da imagem através da aplicação de um filtro simples como o da mediana reforçou esta conclusão, uma vez que isto resultou em uma melhora visual dos resultados obtidos. Foi verificado também que a complexidade das áreas de sombra e de referência afeta diretamente o desempenho do procedimento de compensação. Tal complexidade se refere a diferentes tipos de cobertura da terra presentes nessas áreas, ou seja, áreas mais complexas apresentam maior variabilidade de tipos de cobertura que áreas menos complexas. O procedimento de compensação de sombras é baseado em informações derivadas dos histogramas de intensidades dos pixels que compõem essas duas áreas. Portanto, se a variabilidade das intensidades referentes à área de sombra for maior que a das intensidades que compõem a área de referência, a função de mapeamento restringirá o intervalo de representação das intensidades dos pixels compensados (pixels de sombra), reduzindo o desempenho do procedimento de compensação.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos experimentos realizados permitiram concluir que a combinação do método proposto por Fazan (2007) e Fazan e Dal Poz (2008) com o método proposto por Li *et al.* (2004) trabalhou adequadamente, já que os resultados obtidos se apresentaram bastante satisfatórios.

Também foi possível verificar que o procedimento de compensação (mapeamento de intensidades) é fortemente influenciado pela escolha da área de referência, bem como pela qualidade da imagem

aérea utilizada, conforme mostraram ainda os resultados obtidos.

Uma sugestão para melhorar a qualidade dos resultados fornecidos pelo método é adotar um procedimento mais sofisticado para separar as áreas de referência das áreas de sombra, cujas informações são utilizadas no procedimento de compensação. Neste trabalho, uma simples limiarização foi utilizada e isto contribuiu para reduzir a qualidade dos resultados obtidos na avaliação experimental. Alternativamente, a separação das áreas sombreadas em classes e a derivação manual das áreas de referência correspondentes provavelmente possibilitariam a obtenção de melhores resultados.

Outra possibilidade é utilizar contornos de telhado extraídos diretamente e de maneira automática a partir do MDS/laser, o que eliminaria a necessidade de se transformar o MDS em uma imagem normalizada e extrair manualmente os contornos a partir dela, além de simplificar sua transformação para o referencial cartesiano local. Alternativamente, é possível utilizar outro procedimento para derivar as áreas de sombra, tal como simular a iluminação do MDS/laser a partir de informações da posição solar no instante de aquisição da imagem, a fim de se gerar uma imagem sintética contendo as regiões afetadas por sombras, que são posteriormente refinadas com base nos dados da própria imagem aérea.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor, que possibilitou a realização deste trabalho. Agradecimentos também ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, pelo fornecimento dos dados de varredura a laser, bem como ao Prof. Dr. Edson A. Mitshita da UFPR – Universidade Federal do Paraná, pelo fornecimento das imagens aéreas e respectivos parâmetros de orientação utilizados nos experimentos realizados.

## REFERÊNCIAS

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. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em modelos digitais de elevações e dados de imagens aéreas de alta resolução. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 3, p. 350-369, jul-set, 2008.

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.

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. **Proceedings...** Istanbul, 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. **Proceedings...** Istanbul, 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, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul, p. 173-178.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, 2001. 479 p.

SALVADOR, E.; CAVALLARO, A.; EBRAHIMI, T. Shadow identification and classification using invariant color models. In: IEEE Signal Processing Society International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001, Salt Lake City - EUA. **Proceedings...** Salt Lake City - EUA, p. 1545-1548.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**: with applications in GIS. Boston: McGraw-Hill, 2000, 608 p.