



DETECÇÃO DE OCLUSÃO VIA MÉTODO BASEADO EM GRADIENTES DE ALTURA: REFINAMENTO DE RESULTADO COM O USO DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Occlusion Detection by Height-Gradient-Based Method: Refinement of Result Using Mathematical Morphology

**Henrique Cândido de Oliveira, Aluir Porfirio Dal Poz
& Mauricio Galo**

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) / Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil

henrique.cartografia@gmail.com; {aluir,galo}@fct.unesp.br

Recebido em 30 de Outubro, 2014/ Aceito em 27 de Maio, 2015

Received on October 30, 2014/ Accepted on May 27, 2015

RESUMO

Atualmente, é frequente o uso de ortoimagens em projetos de infraestrutura e planejamento, realizados em regiões urbanas. Sabe-se que estas áreas apresentam, em algumas cidades, uma grande quantidade de edificações altas, que provocam o aparecimento de regiões de oclusão. Isso ocorre devido à projeção perspectiva na qual são obtidas a maior parte das imagens e ao uso de modelos digitais, que representam apenas o terreno, na geração da ortoimagem. Este artigo tem por objetivo principal a avaliação do uso de diferentes operadores morfológicos aplicados ao refinamento da detecção de oclusão em imagens aéreas, para fins de geração de ortoimagens verdadeiras. O método de detecção de oclusão considerado utiliza, em vez de modelos de edificações pré-definidos, apenas um modelo digital de superfície, e se baseia nos gradientes de altura. Os gradientes de altura são destinados à identificação do início das áreas de oclusão - em direções radiais. Para a avaliação do refinamento por meio de ferramentas de morfologia matemática, foram comparados os operadores de dilatação e fechamento, considerando um conjunto de dados reais composto por imagens aéreas e dados LASER, da região de Presidente Prudente-SP / Brasil, com densidade aproximada de 8 pontos/m². Os resultados obtidos, por meio da análise visual e quantitativa, com base nos índices de completude e nível de acerto, indicam que os operadores testados proporcionam níveis de acerto similar, com pequena vantagem para o operador fechamento. Por outro lado, o operador morfológico dilatação proporcionou, para o experimento realizado, uma completude aproximadamente 6% maior que a obtida pelo operador fechamento, indicando a dilatação como o operador mais adequado para o refinamento das áreas de oclusão a partir do método apresentado.

Palavras chaves: Ortoimagem Verdadeira, Gradientes de Altura, Detecção de Oclusão, Morfologia Matemática.

ABSTRACT

Nowadays, the use of orthophotos in projects related with infrastructure and urban plan is frequent. Urban areas usually have many tall buildings that cause occlusions in aerial images. These occlusions can be severe depending on the height of the buildings, image acquisition viewpoint, and due to the use of digital terrain models, which represent only the ground in the orthophoto generation. The occlusion detection method applied in this project uses a digital surface

model for height gradient calculation, instead of using a digital building model as an initial information. Analysis of the surface height-gradient at certain sampled directions allows the identification of occluded regions. The aim of this paper is to assess the use of mathematical morphology to refine results of occlusion detection in aerial images for true orthophoto generation. In the assessment, the dilation and closing operators were compared. For the experiment, a data set composed of aerial images and point cloud from Presidente Prudente-SP / Brazil, with density around 8 points/m², was used. The result was analyzed by quantitative and qualitative indexes, i.e., the completeness and the correctness. Regarding the correctness, both operators presented similarity with a slight advantage for closing operator. On the other hand, the experiment performed with dilation operator results in a completeness index of approximately 6% greater when compared with closing operator. This advantage indicates that dilation is a suitable operator for the purpose of occlusion detection refinement.

Keywords: True Orthophoto, Height Gradient, Occlusion Detection, Mathematical Morphology.

1. INTRODUÇÃO

Projetos ligados a diversas áreas do conhecimento geralmente necessitam de produtos cartográficos, dentre os quais estão os mapas criados a partir de imagens aéreas e orbitais. As imagens provindas de sensores aerotransportados e orbitais usados em Sensoriamento Remoto e Fotogrametria são normalmente adquiridas por meio de uma projeção perspectiva. Este tipo de projeção resulta em uma imagem com escala não uniforme devido à atitude do sensor e, também, à variação do relevo. O produto livre destas distorções é denominado ortoimagem.

A geração de ortoimagens visa eliminar o efeito da inclinação do sensor e do deslocamento na imagem provocado pela variação do relevo. Como resultado, as ortoimagens possuem escala uniforme e apresentam o terreno em sua real posição ortográfica, como ocorre com mapas e cartas convencionais.

A produção de ortoimagem requer imagens digitais, modelo digital de terreno (MDT), assim como parâmetros do sistema sensor (KRAUS, 1993). Com o crescente uso de câmaras digitais, dos sistemas LiDAR (*Light Detection And Ranging*), dos sistemas LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aerotransportados e de sistemas que permitem o georreferenciamento direto da plataforma, por meio da integração de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a sistemas inerciais de navegação - INS (*Inertial Navigation System*), tem-se, a partir desses dados, os elementos necessários para produção de ortoimagens.

Na criação de ortoimagens convencionais, apenas MDT e informações do sensor são utilizados para corrigir o deslocamento devido

à variação de altitude do relevo. Logo, os objetos acima da superfície, como edificações, não são considerados na ortorretificação. Como ressaltado por Chen *et al.* (2007), o produto gerado nessas circunstâncias apresenta distorção nas reais posições dos objetos presentes na área de interesse. Com a grande diferença de altura de alguns objetos acima da superfície, surgem áreas do terreno que não são visíveis nas imagens, quando vistas em projeção perspectiva, influenciando assim o uso de ortoimagens em aplicações como o planejamento urbano, conforme destacado por Xie e Zhou (2008). Essas áreas são denominadas áreas de oclusão.

Para a utilização em planejamento urbano, a ortoimagem deve representar as edificações existentes em projeção ortogonal sobre um plano de referência, sem mostrar, por exemplo, faces laterais dos edifícios. Atualmente, esse tipo de produto tem sido denominado “ortoimagem verdadeira” (AMHAR *et al.*, 1998; CHEN *et al.*, 2007; HABIB *et al.*, 2007; MENDONÇA JR, 2010; OLIVEIRA, 2013).

A identificação dessas áreas de oclusão, mencionada anteriormente, é a chave para geração da ortoimagem verdadeira. Nesse sentido, é necessário identificar as áreas oclusas por objetos (como edificações) que obstruem vias, parques, residências, dentre outras feições.

Existem diferentes formas de detectar as áreas de oclusão. Dentre elas podem ser destacados o método “Z-buffer” descrito por Amhar (1998), Habib *et al.* (2007) e Mendonça Júnior (2010); o “Angular” apresentado por Habib *et al.* (2007) e Antequera *et al.* (2008); o “Projetivo” mencionado por Volotão (2011) e descrito por Wang e Xie (2012) e o método

“Baseado em Gradiente de Altura” proposto por Oliveira e Galo (2013). Estes métodos apresentam diferentes estratégias para a identificação das áreas de oclusão.

Além de diferentes métricas para detecção das áreas de oclusão, também são encontrados na literatura diferentes maneiras de se refinar os resultados obtidos na detecção. Um exemplo é o uso de modelos digitais de construções (MDC) para refinar as áreas de oclusão. Esses modelos tridimensionais representam fielmente todas as edificações de determinada área. No entanto, o MDC, embora seja útil para a geração da ortoimagem verdadeira com boa qualidade, normalmente demanda o uso de aplicativos específicos, bem como um certo trabalho de edição, o que implica no aumento do custo do produto final.

Outra abordagem utilizada no refinamento das áreas de oclusão é o uso de dados de contornos das edificações, ou seja, polígonos limítrofes de todos os telhados da área de interesse, obtidos, por exemplo, por processo de restituição.

Entretanto, será apresentado o uso de morfologia matemática para tal tarefa – melhoria da detecção de oclusão. Deste modo, o objetivo central deste trabalho é apresentar o método de detecção de oclusão baseado em gradientes de altura, assim como avaliar o uso de diferentes operadores da Morfologia Matemática, dilatação e fechamento, na etapa de refinamento de áreas de oclusão.

Destaca-se que este artigo é uma versão revisada e ampliada do artigo apresentado por Oliveira *et al.* (2014), no qual são discutidos alguns aspectos adicionais e realizada a comparação de dois operadores morfológicos, visando o refinamento da área de oclusão.

2. ORTORRETIFICAÇÃO

Uma fotografia resulta da projeção de alvos do mundo real em um plano, a partir de uma perspectiva central. Por se tratar de uma projeção perspectiva, objetos situados em uma mesma posição, porém em diferentes altitudes, são projetados em diferentes posições na imagem, como apresentado na Figura 1 (b). Isso faz com que a escala da imagem varie de um ponto para outro, dependendo do relevo e da posição dos objetos.

O mesmo não ocorre com a projeção ortogonal, Figura 1 (a), pois todos os objetos da superfície são vistos e localizados em projeção ortogonal, não ocorrendo o deslocamento na imagem devido à variação de altura dos objetos/relevo. Portanto, ao corrigir a distorção provocada pela projeção central da câmara e pela variação do relevo pode-se manter uma escala única na imagem, processo este denominado ortorretificação de imagens (MIKHAIL *et al.*, 2001).

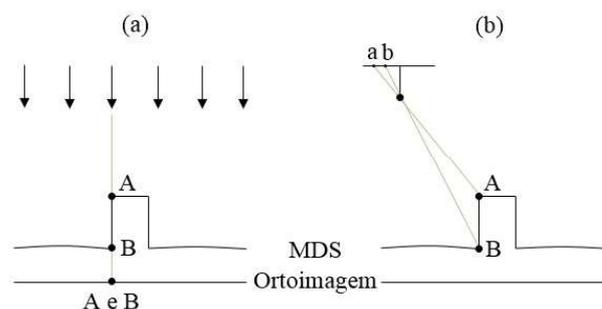


Fig. 1 - (a) Visada ortogonal. (b) Visada perspectiva. Fonte: Oliveira (2013).

Essa mudança de projeção permite o uso deste produto para efetuar mensurações com a mesma qualidade das realizadas em um mapa convencional. Para tal procedimento, são necessários os parâmetros de orientação interior e exterior do sistema de câmara no instante de tomada da fotografia, além de uma representação de superfície (MDT). O procedimento de ortorretificação pode ser feito tanto de maneira direta quanto indireta, como apresentado por Mikhail *et al.* (2001).

No processo de ortorretificação convencional são corrigidas as distorções devido ao relevo (com o uso do MDT), assim como os efeitos da inclinação da imagem, gerando uma ortoimagem convencional. Já a ortoimagem verdadeira é elaborada utilizando um MDS, ou seja, considerando também, os objetos acima do terreno. Porém, o simples fato de modificar a representação da superfície de um MDT para um MDS, não garante uma imagem com todos os objetos perfeitamente retificados, ou seja, com as áreas oclusas identificadas e reprojetaadas com os valores de nível digital (ND) corretos (para as bandas R, G, e B), assumindo que a imagem a ser gerada seja colorida.

2.1 Ortoimagem Convencional e Verdadeira

A diferença principal entre a ortoimagem convencional e a verdadeira é a correção parcial da variação da superfície (apenas o terreno) ou a correção total da superfície (terreno e objetos sobre o terreno).

Segundo Mikhail *et al.* (2001), uma ortoimagem convencional é uma representação fotográfica com correção do efeito do deslocamento devido ao relevo, com a mesma característica geométrica de um mapa topográfico tradicional, uma vez que em ambas representações os objetos são projetados ortogonalmente.

Já a ortoimagem verdadeira, ao invés de tratar a correção apenas ao nível do terreno, considera também, todos os objetos acima dele no processo de ortorretificação – por meio do uso de um MDS. Porém, ao utilizar o MDS, deve-se considerar o efeito de oclusão que estes elementos criam, ou seja, é necessário identificar as áreas de oclusão e preenchê-las com informações radiométricas presentes em imagens adjacentes, pertencentes ao bloco fotogramétrico (OLIVEIRA, 2013).

2.2 Duplo Mapeamento e Áreas de Oclusão

Ao realizar o processo de ortorretificação com a utilização de um MDS, sobre áreas urbanas, onde ocorrem variações abruptas de altitude (nas edificações, por exemplo), surge um efeito denominado duplo mapeamento ou “imagem fantasma”. Esse efeito decorre da concorrência de diferentes células do MDS (groundels) por um mesmo pixel da imagem, como ilustrado na Figura 2. Nesta figura nota-se a concorrência dos groundels F, E e D (do terreno) com C, B e A (do topo do telhado), respectivamente. Neste caso apenas os pontos C, B e A, deveriam ser naturalmente associados aos pixels c, b e a, respectivamente, presentes na imagem.

O principal fator a ser considerado na solução deste problema é a resolução da ambiguidade decorrente da presença de mais de um ponto no espaço objeto que é mapeado para um mesmo pixel na imagem. Em outras palavras, tanto os *groundels* localizados no telhado de um edifício (A, B ou C) quanto os *groundels* no terreno (D, E ou F) correspondem, respectivamente, aos mesmos pixels (a, b ou c)

no espaço imagem. Esta ambiguidade pode ser observada pela repetição dos tons de cinza na ortoimagem: $g(a)$, $g(b)$ e $g(c)$, provocando o chamado duplo mapeamento.

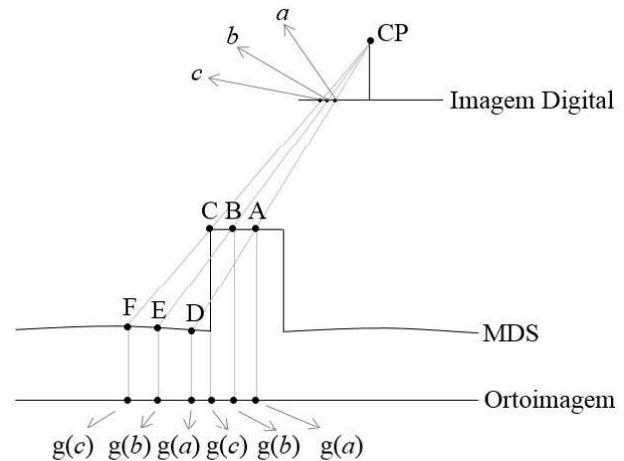


Fig. 2 - Concorrência entre groundels por um mesmo pixel na imagem, assim como o efeito de duplo mapeamento. Adaptado de Habib *et al.* (2007).

Esse efeito pode ser observado na imagem da Figura 3 (a). A edificação em questão possui uma duplicação da imagem em uma das laterais, sendo possível notar claramente este efeito. A região onde se encontra a parcela duplicada são as áreas de oclusão, demarcadas em vermelho na Figura 3 (b).

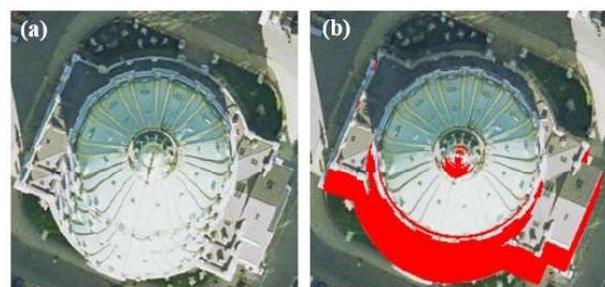


Fig. 3 - (a) Exemplo de duplo mapeamento. (b) Área de oclusão detectada e preenchida com cor sólida. Fonte: Nielsen (2004).

Depois de serem identificadas as áreas de oclusão de uma imagem, faz-se o mesmo procedimento de identificação para as imagens adjacentes (vizinhas). Com isso, é possível obter, para uma determinada área, as informações radiométricas necessárias para seu preenchimento, por meio de busca nas imagens

adjacentes adquiridas a partir de outros pontos de vista.

2.3 Princípio da Detecção de Oclusão por Gradientes de Altura

Todo deslocamento nas imagens causado por variações de altitude da superfície ocorre nas direções radiais, devido à projeção em que são tomadas as imagens. Logo, para detecção de áreas de oclusão, a busca deve ser feita em direções radiais, a partir do ponto nadir (CP’).

A detecção de oclusão por gradientes de altura visa identificar variações abruptas de altitude, principalmente em edificações, para definir o início das áreas de oclusão. A Figura 4 ilustra este princípio, por meio de um perfil hipotético onde há presença de uma edificação. Iniciando a varredura em uma dada direção radial, nota-se uma variação positiva de altura (gradiente positivo – em azul na Figura 4) e posteriormente uma variação negativa de altura (gradiente negativo – em vermelho na Figura 4). Portanto, para cada direção radial é possível criar um vetor contendo os sinais dos gradientes (positivos e negativos).

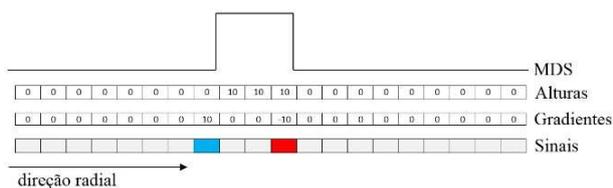


Fig. 4 - Perfil da direção radial e gradientes de altura. Fonte: Oliveira e Galo (2013).

Uma vez obtido esse vetor, é possível iniciar a determinação da área de oclusão e fazer a geração do mapa de visibilidade, que nada mais é que uma matriz binária contendo informação de visibilidade de cada pixel. Cada gradiente negativo é associado a um groundel, cujas coordenadas tridimensionais são conhecidas. Com o groundel referente ao início da oclusão identificado (destacado em vermelho nas figuras 4 e 5), é possível determinar o groundel referente ao final da oclusão (destacado em amarelo na Figura 5). Essa determinação é feita a partir do groundel correspondente ao início da oclusão, bem como da posição e atitude do sensor no momento da obtenção da fotografia. Inicialmente é determinado o pixel da imagem

que corresponde ao início da oclusão (ponto “a” na Figura 5), numa dada direção radial, que por sua vez pode conter mais de uma área de oclusão. Com esta posição conhecida pode-se determinar o groundel correspondente ao final da área de oclusão (ponto “B” na Figura 5), como descrito em Oliveira (2013) e Oliveira e Galo (2013). Esse procedimento é possível com o uso das equações de colinearidade direta (para a determinação do ponto “a”) e inversa (processo de monorestituição no qual é necessário o uso dos gradientes de altura para determinar o ponto “B”), como apresentado por Radwan e Makarovic (1980).

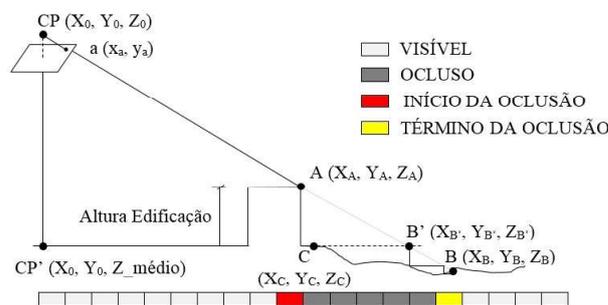


Fig. 5 - Geometria utilizada para determinação do término da oclusão. Fonte: Oliveira e Galo (2013).

Determinados, portanto, o groundel inicial e o groundel final para uma dada direção radial, projetam-se estes elementos no mapa de visibilidade. Todos os pixels presentes entre o início e fim da oclusão são armazenados e rotulados como área de oclusão. Essa determinação é repetida para todas as direções radiais, de maneira que se crie um mapa de visibilidade para toda a imagem.

O método de detecção de áreas de oclusão por gradientes de altura é descrito de forma detalhada em Oliveira (2013) e Oliveira e Galo (2013), sendo apresentada neste trabalho apenas a ideia central.

No exemplo apresentado considerou-se um caso simples onde apenas uma edificação está presente numa dada direção radial. Além disso, nestes dados não foram considerados os erros inerentes ao processo de criação do MDS, que pode ser obtido por diferentes técnicas.

Dados referentes à área urbana, onde se tem uma alta densidade de edificações, e que

passam por um processo de interpolação, por exemplo, na geração de uma malha regular, podem apresentar alguns efeitos indesejáveis. Esses efeitos podem ser propagados para os gradientes de altura, provocando uma diminuição nos valores, uma vez que pontos são interpolados entre o topo e a base da edificação. Essa geração de “novos pontos” pode fazer com que alguns pontos de borda não sejam identificados em função dessa degradação do gradiente de altura, pois a informação de elevação é utilizada como métrica para identificação dos gradientes negativos.

Outra consideração deve ser feita em relação aos erros inerentes aos processos de obtenção do MDS, neste caso, por um sistema de varredura a LASER aerotransportado. É necessário um processo de suavização dos gradientes, para que seja minimizada a ocorrência de falsos gradientes positivos e negativos (devido à baixa qualidade na representação de bordas em dados de varredura LASER). Essa suavização faz com que nem todos os pontos de gradientes negativos (borda – início da oclusão) sejam identificados (Figura 6(a)) e conseqüentemente algumas direções radiais não tenham suas oclusões identificadas, como pode-se ver na Figura 6 (b). Como consequência dessa falha na detecção de oclusão, o preenchimento dessas áreas não seria completo e o resultado da ortoimagem verdadeira não seria o ideal.

Deste modo, as falhas de identificação de algumas áreas de oclusão devem ser tratadas, sendo a morfologia matemática uma das alternativas.

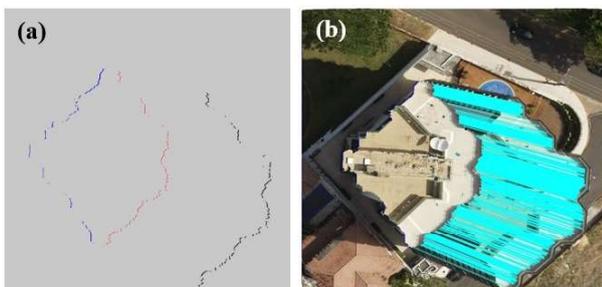


Fig. 6 – (a) Gradientes positivos (em azul), negativos (em vermelho) e fim da oclusão (em preto). (b) Áreas de oclusão com falhas devido à identificação incompleta de gradientes negativos.

2.4 Preenchimento de Áreas de Oclusão

O propósito da geração de ortoimagem verdadeira é representar todos os pontos do terreno, inclusive os oclusos, em projeção ortogonal. Para isso se faz necessário o preenchimento das áreas detectadas como oclusas com informação radiométrica equivalente à representação real do terreno.

Esse preenchimento só é possível devido à sobreposição longitudinal e lateral das imagens aéreas obtidas durante o levantamento aerofotogramétrico. Portanto, para representar as feições antes oclusas, busca-se, em imagens vizinhas (pertencentes ao mesmo bloco), as informações radiométricas dos pixels oclusos, identificados por coordenadas tridimensionais após o processo de ortorretificação, criando assim as ortoimagens verdadeiras.

Como resultado final, após a reposição dos valores de ND para as bandas consideradas, ou os tons de cinza, tem-se a obtenção de uma imagem com todos os pontos projetados ortogonalmente, ou seja, corrigida tanto do relevo quanto da inclinação da câmara e sem o efeito do duplo mapeamento. A Figura 7 apresenta o resultado deste procedimento para a mesma área utilizada na descrição do duplo mapeamento (Figura 3).



Fig. 7 – Exemplo de uma ortoimagem verdadeira. Fonte: Nielsen (2004).

3. PROCESSAMENTO DE IMAGENS POR MORFOLOGIA MATEMÁTICA

No contexto deste trabalho o processamento digital de imagens, por meio dos operadores morfológicos, tem como propósito o refinamento

da detecção das áreas de oclusão, sendo estas, obtidas pelo método baseado em gradientes de altura, como apresentado nas seções anteriores.

A morfologia matemática é uma importante ferramenta para extração de informações a partir de imagens, permitindo a representação ou descrição de formas, tais como limites, esqueletos, *convex hull*, entre outras (GONZALEZ e WOODS, 2010). Neste trabalho a morfologia matemática será utilizada na etapa de pós-processamento, de modo a complementar as áreas de oclusão detectadas.

Para a aplicação de filtragem utilizando morfologia matemática, é necessário a convolução de uma subimagem, de modo que esta subimagem tenha a função de um filtro, auxiliando na verificação de determinada condição ou propriedade de interesse, que varia de acordo com o propósito da aplicação. Esta subimagem recebe o nome de elemento estruturante (EE). A Figura 8 apresenta alguns exemplos de EEs, onde cada parte destacada em cinza representa um componente do EE e o ponto central (.), a sua origem.

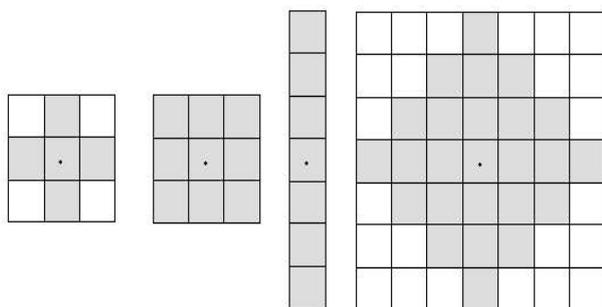


Fig. 8 – Exemplos de elementos estruturantes em diferentes arranjos. Fonte: Gonzalez e Woods (2010).

São diversas as operações morfológicas possíveis, mas neste trabalho foram avaliadas a dilatação e o fechamento, uma vez que estas operações podem contribuir na correção dos problemas de descontinuidade, como mostrado na Figura 6, por exemplo. Uma vez que o fechamento morfológico depende do operador erosão, os operadores dilatação, erosão e fechamento serão brevemente descritos na sequência.

3.1 Dilatação

A dilatação é um operador essencial para processamento morfológico. Muitos algoritmos

morfológicos são baseados nesse operador básico, assim como no operador de erosão. A principal ideia da dilatação é expandir objetos de uma imagem binária, ao contrário do operador de erosão. O controle dessa expansão é feito de acordo com a forma e dimensão do EE utilizado.

Segundo Gonzalez e Woods (2010), a dilatação funciona da seguinte forma: sendo A e B conjuntos de pixels no espaço 2D, a dilatação da imagem A pelo elemento estruturante B, denotada por $A \oplus B$, é definido como:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (1)$$

Essa condição se baseia na reflexão do elemento estruturante em relação a sua origem, seguida da translação por 'z'. A dilatação de A por B é o conjunto de todos os deslocamentos 'z', tal que $(\hat{B})_z$ e A tenham sobreposição de pelo menos um pixel. Por meio desta interpretação pode-se escrever:

$$A \oplus B = \{z | [(\hat{B})_z \cap A] \subseteq A\} \quad (2)$$

Esta é uma das possíveis definições para a dilatação e para outras definições sugere-se Schalkoff (1989) e Shih (2009). Um exemplo do processo de dilatação é apresentado na Figura 9.

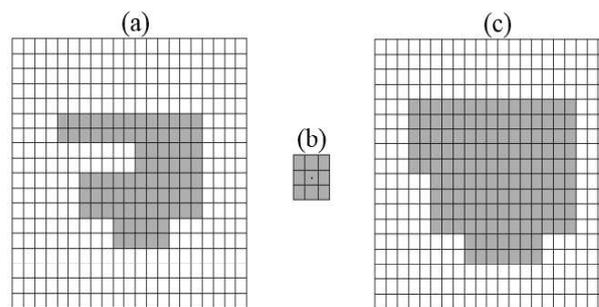


Fig. 9 - Dilatação: (a) Imagem binária. (b) Elemento estruturante. (c) Resultado após processo de dilatação. Fonte: Schalkoff (1989).

A vantagem do uso de um procedimento morfológico, ao invés de utilizar o filtro passa-baixa, por exemplo, é de que o método morfológico resulta diretamente em uma imagem binária. Já o filtro passa-baixa, inicia o processo com uma imagem binária e produz uma

imagem em escala de cinza, necessitando uma etapa de limiarização para converter novamente para a forma binária.

3.2 Erosão

Como mencionado na explanação anterior, a erosão possui a característica inversa à dilatação. Portanto, o objetivo ao se aplicar o operador morfológico de erosão é reduzir os elementos de uma imagem. Assim como a dilatação, o processo de erosão é muito útil em processamento digital de imagens.

Para Gonzalez e Woods (2010), a erosão pode ser descrita da seguinte forma: sendo A e B conjuntos de pixels no espaço 2D, a erosão da imagem A pelo elemento estruturante B, denotada por $A \ominus B$, é definida como:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (3)$$

Isso indica que a erosão de A por B é o conjunto de todos os pontos 'z', tal que B transladado por 'z' está contido em A. Afirmar que B está contido em A é equivalente a dizer que B não tem elementos comuns com o fundo da imagem. Logo, pode-se formular a operação de erosão da seguinte maneira:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \cap A^c = \emptyset\} \quad (4)$$

sendo A^c o complemento de A e \emptyset um conjunto vazio.

A Figura 10 apresenta um exemplo de erosão sobre a mesma imagem apresentada na Figura 9 (a) e utilizando o mesmo elemento estruturante (Figura 9 (b)).

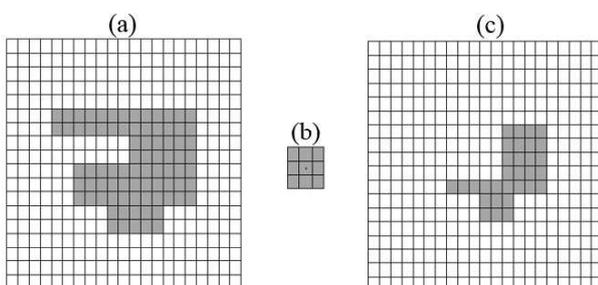


Fig. 10 - Erosão: (a) Imagem binária. (b) Elemento estruturante. (c) Resultado após processo de erosão. Fonte: Schalkoff (1989).

3.3 Fechamento

Algumas aplicações práticas utilizam combinações entre a dilatação e a erosão, como é o caso do operador denominado "fechamento". Esse operador é composto pela seguinte sequência: dilatação de uma imagem binária seguida da erosão (SCHALKOFF, 1989). O operador fechamento é representado da seguinte forma:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (5)$$

O fechamento pode ser interpretado como uma sequência destinada ao preenchimento de falhas ou pequenas concavidades. Portanto, é usado para eliminar pequenas falhas e remover saliências internas à determinada feição (SHALKOFF, 1989), sendo apropriado para o problema apresentado.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Para a execução do refinamento das áreas de oclusão, partiu-se do resultado da detecção de oclusão pelo método baseado em gradientes de altura, apresentado na Seção 2.3. Os experimentos apresentados mostram a área de oclusão obtida por esse procedimento, bem como após a aplicação dos seguintes operadores morfológicos: dilatação e fechamento.

A seguir é apresentado um resultado obtido pelo método descrito anteriormente (Figura 11 (a)), no qual nota-se falhas na detecção de oclusão. Como dado de entrada para o refinamento, tem-se uma imagem binária com pixels referentes à oclusão (em branco) e em preto, o fundo (Figura 11 (b)). Com a imagem binária criada, aplicou-se o operador de dilatação, com EE quadrado de dimensão 11x11, sendo o resultado observado na Figura 12 (a). Com a dilatação executada, os novos pixels relacionados à oclusão foram sobrepostos novamente na imagem ortorretificada (Figura 12 (b)). O mesmo procedimento foi realizado com o operador de fechamento e o resultado é apresentado na Figura 13.

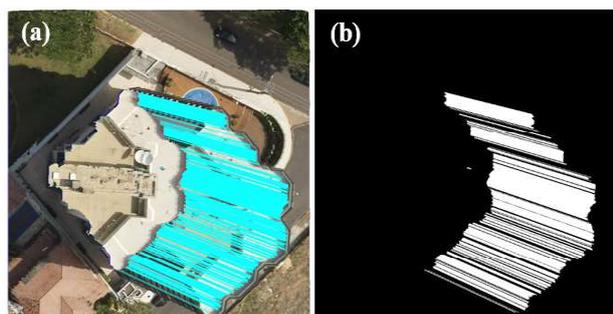


Fig. 11 - (a) Oclusão inicial. (b) Pixels referentes à oclusão.

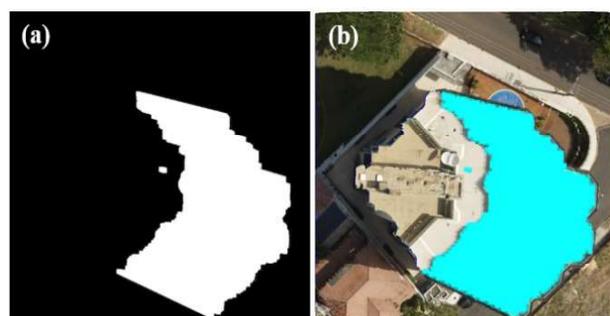


Fig. 12 - (a) Pixels referentes à oclusão após processo de dilatação. (b) Ortoimagem com as áreas de oclusão preenchidas.

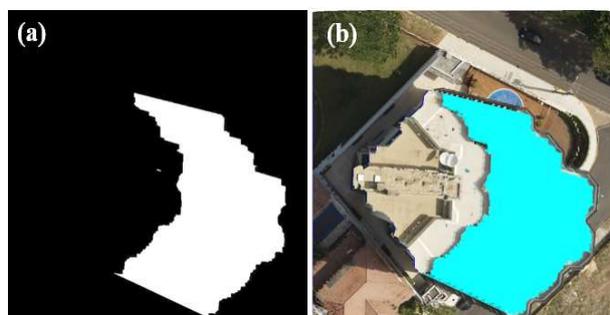


Fig. 13 - (a) Pixels referentes à oclusão após processo de fechamento. (b) Ortoimagem com as áreas de oclusão preenchidas.

Visualmente é possível notar a melhoria quanto à detecção das áreas de oclusão, com o uso dos operadores morfológicos (dilatação e fechamento). Além do resultado visual foi realizado o cálculo do índice de completeza e nível de acerto, adaptados de Wiedemann *et al.* (1998) e Fazan e Dal Poz (2013), para as áreas de oclusão detectadas e mostradas nas figuras 11, 12 e 13. Para esse cálculo foi necessária a criação manual de um polígono que representa a área de oclusão, para ser utilizado como referência. A Tabela 1 apresenta os resultados para os índices mencionados.

Tabela 1: Índices de completeza e nível de acerto para o experimento realizado

Refinamento	Completeza (%)	Nível de Acerto (%)
Sem refinamento	63,29	99,89
Com dilatação	89,80	98,39
Com fechamento	84,15	99,91

Nota-se, a partir do índice de completeza um aumento no seu valor quando os operadores de dilatação e fechamento são comparados com o procedimento manual (sem refinamento). Essa melhoria é de extrema importância, pois quanto mais completa for área de oclusão detectada, melhor será a representação da ortofotografia verdadeira, evitando a permanência de falhas. Quanto ao nível de acerto nota-se em relação ao procedimento sem refinamento uma redução para a dilatação ($\sim -1,5\%$) e um pequeno aumento para o fechamento ($\sim +0,02\%$). Essa diminuição do nível de acerto não prejudica o resultado, pois mesmo que uma área seja detectada erroneamente como oclusa, ela será preenchida por informações radiométricas de imagens adjacentes.

A seguir é apresentada a causa das diferenças observadas no índice “Nível de Acerto” entre a dilatação e o fechamento (Figura 14).

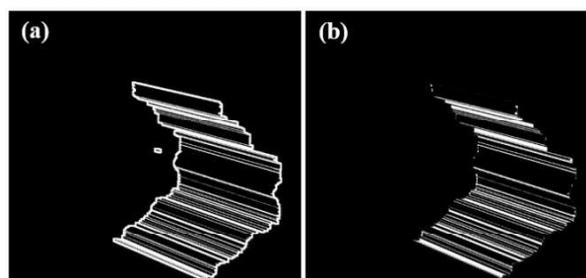


Fig. 14 – (a) Diferença entre o resultado da dilatação e a oclusão inicial. (b) Diferença entre o resultado do fechamento e a oclusão inicial.

O processo de dilatação, além de recuperar corretamente as falhas na detecção das áreas de oclusão, também expande as bordas dessa área, definindo assim, áreas visíveis como oclusão. A Figura 14 (a) apresenta a diferença entre o resultado da dilatação (Figura 12 (a)) e a oclusão detectada inicialmente (Figura 11 (b)). Já a Figura 14 (b) mostra a diferença entre

o fechamento (Figura 13 (a)) e a oclusão inicial (Figura 11 (b)). Com isso é possível fazer uma análise visual da diferença entre os resultados desses operadores. Embora não tenha sido feito uma análise estatística, pode-se considerar, de forma qualitativa e quantitativa, que a diferença em “Nível de Acerto” para a dilatação e o fechamento não é significativa, diferentemente da “Completeza” quando comparada ao resultado sem refinamento.

Depois de identificada a área de oclusão numa imagem, é possível fazer a transferência da informação radiométrica (valores de R, G e B, neste experimento) de imagens do bloco, nas quais essa área de oclusão seja visível. O resultado dessa transferência de valores radiométricos e projeção gera o que é denominado ortoimagem verdadeira.

A seguir é apresentada a ortoimagem verdadeira gerada após o refinamento por morfologia matemática, utilizando a dilatação (operador que proporcionou maior índice de completeza).

Embora seja possível notar que na maior parte da imagem foi feito o preenchimento da oclusão, pode-se notar que não há um preenchimento completo da informação radiométrica, restando ainda áreas de oclusão (em ciano na Figura 15). Isso se deve ao fato de que foram utilizadas nesse experimento apenas duas imagens do bloco, não contendo, portanto, outras imagens em que esta área de oclusão seja visível.

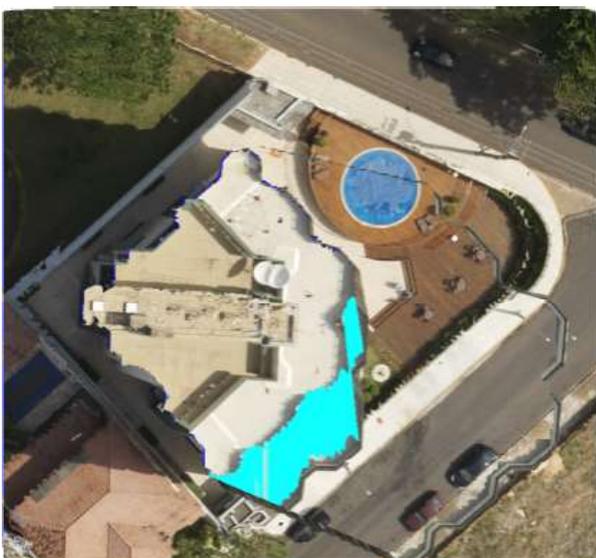


Fig. 15 - Ortoimagem verdadeira com oclusão preenchida com auxílio da morfologia matemática.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

O propósito principal deste trabalho foi analisar a contribuição dos operadores morfológicos de dilatação e de fechamento no refinamento das áreas de oclusão, visando a geração de ortoimagens verdadeiras. O método de detecção de oclusão utiliza como métrica os gradientes de altura, estimados a partir de um MDS que neste caso foi obtido a partir de dados de um sistema de varredura a LASER. Os gradientes de altura permitem a identificação do início das áreas de oclusão, sendo possível a determinação do final das mesmas por meio da projeção do ponto, onde há a variação negativa de altura, no terreno.

Na aplicação deste método, como pode ser visto nos experimentos mostrados, existem falhas na detecção de oclusão, que podem ser provocadas por diferentes causas. Dentre as possíveis causas pode-se considerar: erros inerentes à geração do MDS; erros provocados pela interpolação na geração de uma malha regular; e como consequência a propagação para o cálculo dos gradientes de altura. Para correção desse problema foi proposta a aplicação de dois operadores morfológicos, que foram avaliados.

Em termos de nível de acerto ao utilizar estes operadores, pode-se observar que eles foram equivalentes, com pequena vantagem para o operador fechamento. No entanto, a melhoria obtida com o uso dos operadores morfológico foi significativa, uma vez que a completeza das áreas de oclusão detectadas subiu de 63% (sem refinamento) para aproximadamente 90% e 84% ao utilizar a dilatação e fechamento, respectivamente, para o experimento.

Como continuidade deste trabalho pretende-se realizar experimentos adicionais com diferentes conjuntos de dados e diferentes edificações. Além disso, pretende-se também fazer a detecção de múltiplas oclusões, assim como a aplicação de outros elementos estruturantes no processo de refinamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP/FCT pela estrutura e dados fornecidos ao trabalho, bem como aos docentes: Almir O. Artero, Aylton Pagamisse e Milton H. Shimabukuro pelo suporte

durante o desenvolvimento de parte deste trabalho. Adicionalmente, os autores agradecem à FAPESP pelo apoio, por meio de bolsa de doutorado cedida ao primeiro autor (Processo nº 2013/21647-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMHAR, F.; JANSA, J.; RIES, C., The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, p.16-22, 1998.

ANTEQUERA, R.; ANDRINAL, P.; GONZÁLEZ, R.; BREIT, S.; DELGADO, J.; PÉREZ, J. L.; UREÑA, M.; MOLINA, S. Development of an Integrated System of True Ortho-rectification. The Altas LRTO System. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37, Part B4, p.253-258, 2008.

CHEN, L.; TEO, T.; WEN, J.; RAU, J. Occlusion-Compensated True Orthorectification For High-Resolution Satellite Images. In: **The Photogrammetric Record**. v. 22, n. 117, p.39-52, 2007.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. Ed. 3. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 624p.

HABIB, A. F.; KIM, E.; KIM, C. New Methodologies for True Orthophoto Generation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v.73, n. 1, p.25-36. 2007.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Standard Processes**. v. 1, Bonn: Ferd. Dümmler Verlag. 1993. 397 p.

MENDONÇA JÚNIOR, M. G. **Reconstrução de edificações para geração de ortoimagens verdadeiras com empregos de dados LIDAR**. Tese de Doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná – Curitiba – Fevereiro de 2010. 238 p.

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

NIELSEN, M. O. **True Orthophoto Generation**. Master Thesis. Universidade Técnica da Dinamarca. Informatics and Mathematical Modelling. Kgs. Lyngby. 2004. 142 p.

OLIVEIRA, H. C. **Detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagens verdadeiras utilizando dados LASER**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente. Brasil. 2013. 95 p.

OLIVEIRA, H. C.; GALO, M. Occlusion detection by height gradient for true orthophoto generation, using LiDAR data. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. XL-1/W1, p.275-280, 2013.

OLIVEIRA, H. C.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. Uso de morfologia matemática para refinamento de detecção de áreas de oclusão por gradientes de altura. In: **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2014, Gramado - RS, 3-7 de Agosto. p. 1-9.

RADWAN, M.; MAKAROVIC, B. Digital mono-plotting system-improvements and tests. **ITC Journal**, p.510-533, 1980.

SCHALKOFF, R. J. **Digital Image Processing and Computer Vision**. Singapore: John Wiley & Sons, 1989. 489 p.

SHIH, F.Y. **Image Processing and Mathematical Morphology Fundamentals and Applications**. CRC Press, 2009. 415 p.

VOLOTÃO, C. F. S. **Geração de Ortoimagens para aplicações urbanas: desenvolvimento das equações e protótipo experimental**. **Dissertação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2001. 115 p.

WANG, X.; XIE, J. A method for true orthophoto generation based on projection and iteration strategy. In: **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.I-4, 2012.

WIEDEMANN, C.; HEIPKE, C.; MAYER, H.; JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: **Empirical Evaluation Methods in Computer Vision**, Ed.

Bowyer. IEEE Computer Society Press, p.172-187, 1998.

XIE, W.; ZHOU, G. Experimental Realization of Urban Large-Scale True Orthoimage Generation. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial**

Information Sciences. v. 37, Part B1, 2008.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. Rectilinear building roof contour extraction based on snakes and dynamic programming. In: **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.** v. 25, p.1-10. 2011.