

Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de *Pinus elliottii*“Local maximum filtering” applied on digital aerial photography for counting tree crowns on *Pinus elliottii* reforestationAttilio Antonio Disperati¹, João Roberto dos Santos²,
Paulo Costa de Oliveira Filho³ e Till Neeff⁴**Resumo**

A técnica “filtragem de locais máximas” (LM) foi aplicada em uma fotografia aérea 70 mm visando a marcação e a contagem do topo de árvores de um reflorestamento de *Pinus elliottii*. A área de estudo localiza-se na Floresta Nacional de Irati, Paraná. A fotografia aérea, colorida normal e em escala 1:4.000, foi digitalizada nas resoluções de 100, 200, 300 e 600 dpi. Na imagem digital de 600 dpi, utilizada como referência, foi efetuada a interpretação visual marcando 704 topos de árvores, valor este 3% inferior ao total estimado na fase de verificação em campo. Nas imagens com 100, 200 e 300 dpi foram aplicados quatro tamanhos de filtros condizentes com o tamanho das copas observadas nas fotografias aéreas. Na análise, foi verificado que quanto menor o tamanho do filtro utilizado, maior foi o número de pontos de máximas encontrados. O resultado mais próximo da imagem de referência foi obtido com a resolução de 300 dpi e filtro [21 x 21] pixels, com uma acurácia de identificação da ordem de 70,7%. Sob o ponto de vista de aplicação prática florestal, os resultados obtidos mostram que a técnica LM no tratamento dos dados é significativamente promissora para a marcação e conseqüente contagem do topo das coníferas.

Palavras-chave: “Filtragem de locais máximas”, Copa de árvores, Fotografias aéreas, Inventário florestal, Sensoriamento remoto, Reflorestamento

Abstract

Local maximum filtering technique (LM) was applied in a 70 mm aerial photograph in order to mark and to count the top of trees in a *Pinus elliottii* reforestation. The study area is located in the Irati National Forest, Paraná State, Brazil. The aerial photograph, normal color and in scale 1:4.000, was scanned with the 100, 200, 300 and 600 dpi resolutions. In the 600 dpi image, used as reference, 704 top of trees were marked by visual interpretation, which corresponded to 3% less than the total number of trees estimated on the field. In the 100, 200 and 300 dpi images, four different sizes of filter were applied based on the crown sizes observed on the photointerpretation. The results showed that the smaller the size of the filter used, the bigger is the number of maxima. The closest result from the photointerpretation value was acquired with 300 dpi image and a filter size of [21 x 21] pixels, resulting a general accuracy of 70,7%. As practical forest application is concerned, the obtained results showed that the value of local maximum filtering is useful in order to mark and to count the number of top of the conifer trees.

Keywords: “Local maximum filtering”, Tree crowns, Aerial photographs, Forest inventory, Remote sensing, Reforestation

INTRODUÇÃO

Há uma tendência atual, no setor florestal, de obtenção de informações detalhadas dos talhões florestais e da floresta nativa para dar su-

porte às práticas de manejo florestal e outras atividades. Muitas dessas informações, referentes a variáveis das árvores e dos povoamentos (com-

¹Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR-153 km 7 - Bairro Riozinho - Irati, PR - 84500-000 – E-mail: disperati@avalon.sul.com.br

²Pesquisador Titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Av. dos Astronautas, 1758 - São Jose dos Campos, SP - 12227-010 – E-mail: jroberto@dsr.inpe.br

³Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR-153 km 7 - Bairro Riozinho - Irati, PR - 84500-000 – E-mail: paulocostafh@irati.unicentro.br

⁴Pesquisador visitante do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Av. dos Astronautas, 1758 - São Jose dos Campos, SP - 12227-010 – E-mail: neeff@biom.uni-freiburg.de

posição de espécies, contagem, diâmetro médio e densidade das copas), podem ser obtidas em fotografias aéreas de escalas grandes (maiores do que 1:5.000). A utilização de softwares de processamento de imagens, para automatizar as análises, necessita de imagens digitais. Tais imagens podem ser obtidas diretamente, a partir de sensores instalados a bordo de aviões ou satélites (tais como IKONOS e QUICKBIRD), ou indiretamente pela digitalização em “scanners”. Quando apresentam acentuada resolução espacial (tamanho do elemento de resolução no terreno - ERT - inferior a quatro por quatro metros), essas imagens são ditas de alta resolução.

O alto nível de detalhamento da imagem aérea digital de alta resolução favorece pensar em árvores individuais e nas informações contidas nelas ao invés de pensar em talhão florestal ou na floresta como um todo (GOUGEON, 2000). Propicia também uma excelente oportunidade para a aplicação de novos procedimentos metodológicos (DISPERATI e OLIVEIRA FILHO, 2005) visto que a maioria dos softwares de processamento digital de imagens utilizadas nos dias atuais foi desenvolvida conceitualmente na década de 1970, tendo como base as imagens satelitárias de baixa resolução (ERT igual a 80 m). Os algoritmos para a extração semi-automática/automática das variáveis das árvores e dos povoamentos, citadas anteriormente, seriam de grande importância para os responsáveis florestais em suas atividades (PERIN *et al.*, 2004) e este é o enfoque do presente trabalho.

A partir da última década, entre os diversos algoritmos desenvolvidos para uso em imagens aéreas digitais de alta resolução, está a técnica “local maximum filtering” (LM), conhecida também como “filtragem de locais máximas” (LM), testada e cada vez mais empregada em procedimentos automáticos e semi-automáticos de marcação do topo das árvores e, conseqüentemente, de contagem de suas copas.

A técnica LM é uma abordagem adequada para encontrar a localização individual da árvore, considerando que o topo das árvores tem uma alta reflectância na imagem aérea em comparação com a sua vizinhança. Isso usualmente ocorre quando as árvores têm uma dominância apical e são rodeadas por baixa reflectância, em razão de sombras em dossel fechado da floresta. Por este motivo, a técnica tem sido mais aplicada em áreas florestais de coníferas do que em folhosas.

Na aplicação da técnica LM, a magnitude dos valores digitais dentro de um determinado fil-

tro (janela) em uma imagem de alta resolução é comparada, visando determinar se o valor digital do pixel central é maior do que todos os seus vizinhos dentro dessa secção investigada (WULDER *et al.*, 2001). Especificado pelo usuário, esse filtro, constituído de uma matriz bidimensional com número ímpar (linhas x colunas) e de tamanho fixo, é passado sobre todos os pixels pertencentes à área florestal da cena, determinando assim os pontos de máxima intensidade, pontos estes assinalados como a posição do topo de cada árvore. A técnica é aplicada sobre a imagem em preto e branco ou, então, simplesmente sobre uma banda da imagem multiespectral (GOUGEON e LECKIE, 2003).

A eficácia da técnica LM em localizar árvores individuais, muitas vezes, é limitada pela relação entre a resolução espacial da imagem de alta resolução e o tamanho das copas na imagem (WULDER *et al.*, 2000). Em face disso, é necessário que a resolução espacial da imagem seja considerada mais fina que a média das dimensões das copas das árvores. O tamanho do filtro é outra variável importante na aplicação da técnica, por definir o tamanho da copa usado como padrão no processo de comparação conduzido em toda a imagem. De acordo com WULDER *et al.* (2000), se a janela usada para filtragem for muito pequena, ocorrem erros de comissão através da marcação de árvores não existentes ou de múltiplos picos de radiância na copa individual da árvore. Caso a janela seja grande demais, aumentam-se os erros de omissão. Como conseqüência natural da aplicação da técnica e a respectiva marcação dos possíveis pontos na imagem caracterizando os topos das árvores, o número total de máximas encontrado na imagem é um indicador do número de árvores existentes no local (KINI e POPESCU, 2004).

A técnica LM tem sido usada também como uma ferramenta inicial em processos automáticos e semi-automáticos de delimitação de copas de árvores em imagens aéreas de alta resolução. Ela é usada inicialmente para detectar as possíveis copas de árvores e, em seguida, através de regras específicas, efetua-se a delimitação de suas copas. Exemplos de algoritmos usados são: “clustering” (CULVENOR *et al.*, 1999) e “valley-following” (GOUGEON, 1999). Mais recentemente, essa técnica de filtragem local passou a ser utilizada em outros produtos de sensores, como em imagens LIDAR, através do desenvolvimento de procedimentos de detecção individual de árvores baseados em modelos de altura do

dossel (PITKÄNEN *et al.*, 2004) ou fusionadas com dados ópticos multispectrais (POPESCU e WYNNE, 2004); imagens interferométricas de radar aerotransportado derivadas de bandas X e P, também já foram empregadas com sucesso em estudos dos padrões espaciais de árvores da floresta, modelados por uma série de modelos de processos pontuais de Markov (NEEFF *et al.*, 2005). Nesse contexto de fundamentação temática desenvolvida, o presente trabalho de pesquisa teve como objetivo geral aplicar a técnica da “filtragem de locais máximas” para a marcação do topo das copas das árvores e, conseqüentemente, efetuar a contagem de suas copas, em parte de um povoamento de *Pinus elliottii*, fazendo uso de uma fotografia aérea 70 mm colorido normal digitalizada.

Os objetivos específicos da pesquisa foram: aplicar um programa computacional referente à técnica da “filtragem de locais máximas” em uma fotografia aérea 70 mm digital recobrimdo parte de uma área de reflorestamento; avaliar o efeito de diferentes resoluções da digitalização da fotografia aérea, de diferentes tamanhos de filtros na detecção e marcação do topo das copas das árvores e do respectivo tempo de processamento digital; avaliar o desempenho da técnica LM no processo de modelagem dos padrões pontuais espaciais de árvores.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi conduzida em uma área de reflorestamento com *Pinus elliottii* (talhão 90), localizada na Floresta Nacional (Flona) de Irati e com coordenadas geográficas centrais de longitude oeste 50°35'07" e de latitude sul 25°23'19". O reflorestamento de 15 hectares foi formado em 1967 e submetido a quatro desbastes, sendo o último realizado em 1998.

A Flona, uma unidade de conservação do IBAMA com 3.495 hectares e com altitude média de 893 m, localiza-se no Município de Teixeira Soares, distando 9 km da cidade mais próxima, Irati. O clima da região é “Cfb”, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.442 mm e sem estação seca. A temperatura média em janeiro é de 22° C e a de julho fica em torno de 10° C, com mais de cinco geadas por ano. O relevo local é considerado de ondulado a plano. O solo, classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo, apresenta acidez média. Em 1986, os reflorestamentos e a flores-

ta com predominância de araucária recobrim 37,45% e 36,42%, respectivamente da área total da Flona. No seu entorno ocorrem principalmente atividades agrícolas.

Materiais e suporte computacional

Na realização desse trabalho de pesquisa foi utilizada uma fotografia aérea vertical 70 mm, colorido normal e na escala de 1:4.000, adquirida no aerolevanteamento de 4 de agosto de 2002 que consistiu em apenas uma linha, sobrevoada em três escalas diferentes (1:1000, 1:2.000 e 1:4.000). O reflorestamento apareceu somente em três fotografias seqüenciais 1:4.000 e escolheu-se aquela em que ele era mais central. Impressa em papel no tamanho 20 cm x 28 cm, essa fotografia aérea foi digitalizada, empregando-se um scanner de mesa HP Scanjet 3570c, tamanho A4.

O principal software utilizado foi um programa computacional de aplicação da técnica LM, escrito em linguagem de programação C++ para ser executado em ambiente MS-DOS. O programa, escrito por um dos autores, em vista da não disponibilidade de software profissional, determina basicamente as coordenadas (x e y) e o valor de brilho dos pixels determinados como sendo o local de intensidade máxima, onde o filtro utilizado refere-se a uma matriz bidimensional com número ímpar de elementos (linhas e colunas) e com tamanho pré-definido antes da execução do programa (DISPERATI *et al.*, 2004); o resultado é para ser visualizado no Arc View 3.2. Adicionalmente, utilizou-se um software de edição de imagens para o recorte digital das imagens digitalizadas. O hardware empregado foi um PC Pentium 4 com CPU 1.60 GH, 512 MB de RAM.

Procedimento metodológico

A seqüência metodológica foi constituída das seguintes atividades:

- a) digitalização da fotografia aérea colorida normal nas resoluções de 100, 200, 300 e 600 dpi para gerar as respectivas imagens aéreas digitais a serem tratadas;
- b) recorte das quatro imagens coloridas no formato digital, em ambiente do software de edição de imagens, para definir a mesma área de reflorestamento a ser processada, face às distintas resoluções no processo de digitalização da fotografia aérea;
- c) conversão das imagens digitais coloridas nas resoluções 100, 200 e 300 dpi em escala de cinza; os tamanhos dos respectivos arquivos estão expressos na Tabela 1;

Tabela 1. Tamanho dos arquivos das diversas imagens digitais utilizadas no processamento.
Table 1. Size of the digital images files used in the processing.

Resolução	Tamanho (em pixels) do arquivo digital	Tamanho do ERT em metros	Tamanho em disco do arquivo digital colorido	Tamanho em disco do arquivo digital monocromático
100 dpi	276 x 151	1,01	135 Kb	56 Kb
200 dpi	560 x 308	0,51	517 Kb	180 Kb
300 dpi	831 x 458	0,34	1,10 MB	388 Kb
600 dpi	1672 x 932	0,17	4,47 MB	Não foi gerada a imagem

d) definição dos tamanhos dos filtros a serem usados na aplicação da técnica LM nas três imagens mencionadas no item anterior, com base no número de pixels que representavam o diâmetro médio das copas nas digitalizações observadas no monitor do computador. O filtro é formado de valores 0 e 1, estando os valores zero situados nos cantos da matriz, indicando os pixels que serão desconsiderados na análise e resultando assim em uma máscara dita circular, formada por valores 1. Três dos dez filtros usados são mostrados na Figura 1. Quatro diferentes tamanhos fixos de filtro foram usados no processamento da LM em cada imagem digital (Tabela 2). O menor tamanho numérico de filtro foi [7x7] pixels na imagem 100 dpi, enquanto a maior janela adotada foi [25x25] pixels na imagem 300 dpi. Os filtros na imagem 100 dpi correspondiam ao tamanho de copa circular variando de 7,1 m a 13,1 m. Similarmente, nas outras imagens (200 e 300 dpi) correspondiam a variações de copas circulares de 6,7 m a 9,7 m e de 6,5 m a 8,5 m, respectivamente;

e) aplicação do programa da técnica LM nas imagens em escala de cinza com 100, 200 e 300 dpi, com a respectiva anotação do tempo (relógio de pulso) de processamento;

f) plotagem (em ambiente do Arc View 3.2) dos locais de intensidade máxima provenientes dos arquivos digitais resultantes do processamento das três imagens em escala de cinza, nas respectivas imagens coloridas digitalizadas, utilizando a listagem das coordenadas x e y;

g) interpretação visual (em ambiente do Arc View 3.2) para marcação do topo das árvores da imagem 600 dpi colorida normal utilizada como referência, tendo como resultante um mapa do posicionamento pontual de cada árvore no talhão investigado, para uma posterior checagem em campo de maneira amostral;

h) levantamento expedito em pontos amostrais de campo. Nessa amostragem, locada aleatoriamente e orientada com o eixo menor na direção Norte-Sul, levantaram-se dados dendrométricos da floresta (diâmetro da copa,

altura total e comercial da árvore e contagem das árvores). A determinação das alturas das árvores foi feita com o auxílio do Blume Leiss; as dimensões das copas das árvores foram medidas nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste, projetando-se visualmente as respectivas extremidades da copa no terreno e medindo as distâncias com trena;

i) análise comparativa de desempenho interpretativo entre os produtos gerados, inclusive com a seleção do tamanho do filtro mais adequado para estabelecimento da distribuição espacial da copa de árvores, nas imagens com 100, 200 e 300 dpi. Nessa etapa metodológica foram observados, através de simples comparação, o número de máximas nas cenas tratadas e o número total de árvores da fotointerpretação, com os respectivos posicionamentos locais;

j) geração dos mapas resultantes da fotointerpretação e da aplicação da técnica LM nas respectivas imagens com 100, 200 e 300 dpi;

k) determinação do número total de erros de comissão e omissão no modelo local de distribuição pontual das árvores, para cada uma das três resoluções estudadas, adotando como referencial o mapa da fotointerpretação obtido com a resolução de 600 dpi e apoiado em informações de campo.

Tabela 2. Tamanho dos filtros usados na aplicação da técnica do LM.

Table 2. Size of the windows used in the application of the LM technique.

Resolução	Tamanho (em pixels) da janelas
100 dpi	7 x 7; 9 x 9; 11 x 11; 13 x 13
200 dpi	13 x 13; 15 x 15; 17 x 17; 19 x 19
300 dpi	19 x 19; 21 x 21; 23 x 23; 25 x 25

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em duas partes, discutindo-se inicialmente os aspectos visuais e qualitativos das quatro imagens digitalizadas referentes à área de estudo. Na segunda parte apresentam-se os resultados quantitativos da aplicação da técnica LM e sua integração com os resultados da fotointerpretação.

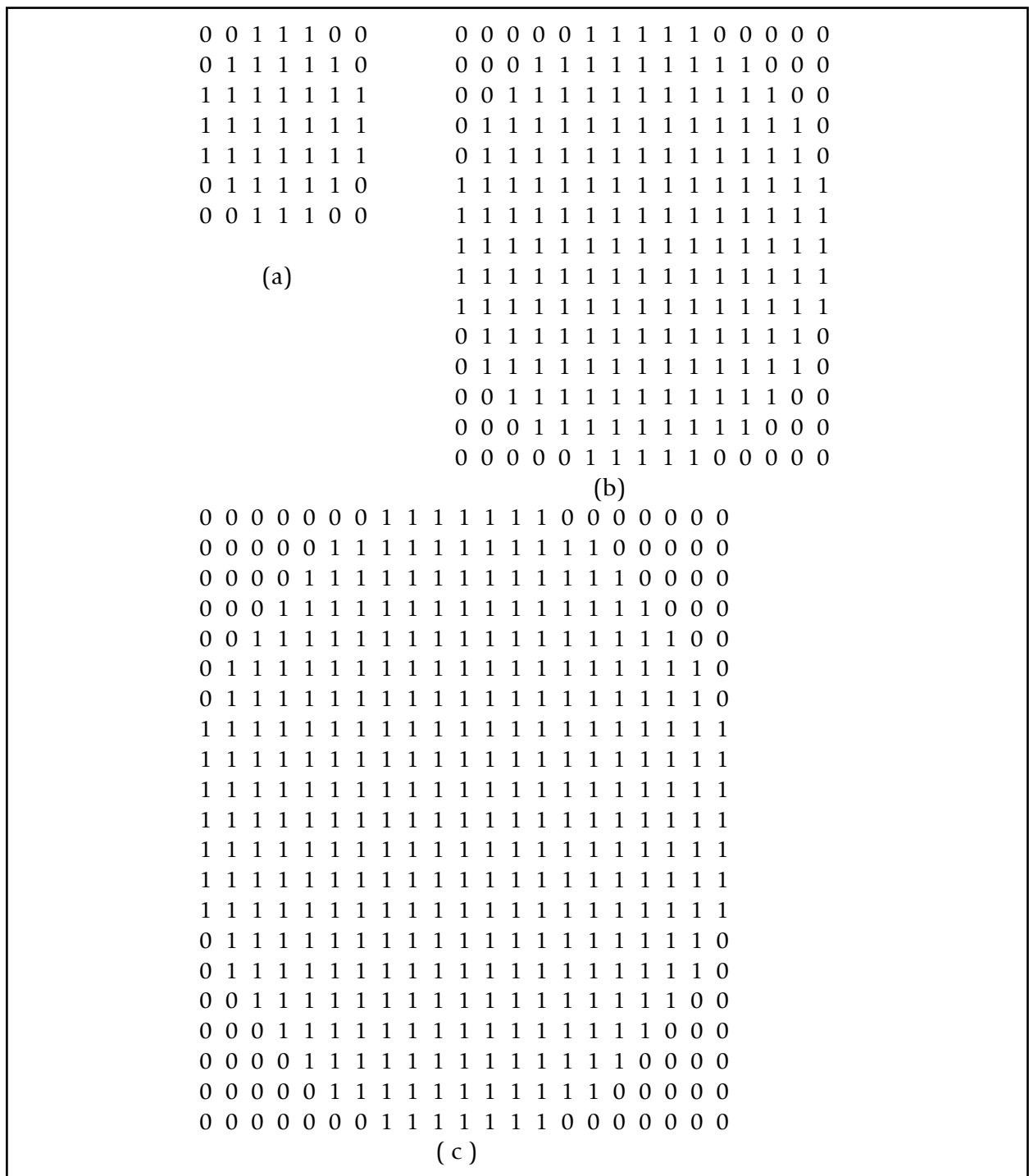


Figura 1. Filtros de tamanho [7 x 7], [15 x 15] e [21 x 21] pixels, respectivamente, para aplicação na técnica LM.
Figure 1. (Windows of [7 x 7], [15 x 15] and [21 x 21] pixels for applied in the LM technique).

Análise qualitativa

A área em estudo (Figura 2) teve posicionamento na parte central inferior da fotografia aérea, ocupando aproximadamente 4,5 hectares do povoamento de *Pinus elliottii*. Na Figura 3 é apresentada, para exemplificação, parte da Figura 2b nas quatro resoluções de digitalização da fotografia aérea 70 mm na sua forma original, cujos produtos permitem fazer considerações qualitativas.

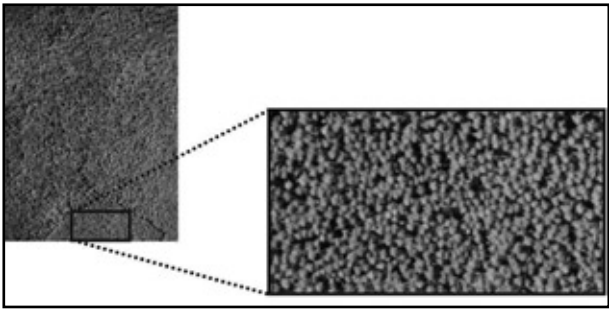


Figura 2. Fotografia aérea (a) e área de estudos ampliada (b).
Figure 2. Aerial photograph (a) and study area extended (b).

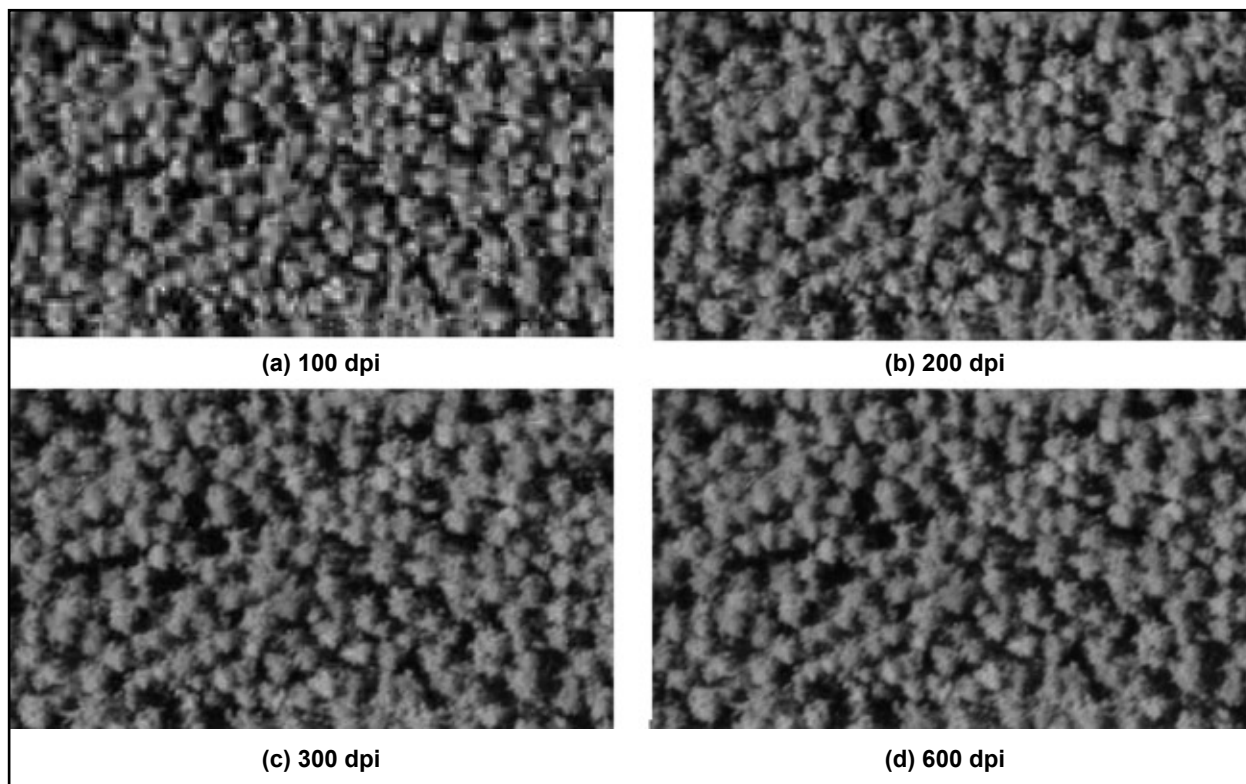


Figura 3. Imagens provenientes da digitalização da fotografia aérea colorida normal 70mm com resoluções de (a) 100 dpi, (b) 200 dpi, (c) 300 dpi e (d) 600 dpi.

Figure 3. Images from the scanning of the 70mm normal color air photograph with resolutions of (a) 100 dpi, (b) 200 dpi, (c) 300 dpi (c) and (d) 600 dpi.

Foi possível delimitar, com maior ou menor grau de acurácia, o perímetro da maioria das copas das árvores através do contraste das áreas sombreadas periféricas e a marcação do correspondente topo das árvores, levando em conta o nível de resolução adotado na digitalização.

O espaçamento entre as árvores do reflorestamento considerado não era uniforme em toda a área, resultado da efetivação de quatro desbastes, provavelmente do tipo seletivo, sendo o último sido executado em 1998 e, portanto, cinco anos antes do aerolevantamento.

Havia alguns agrupamentos de árvores cujas copas se tocavam, dificultando a delimitação individual da copa e mesmo a marcação do topo da árvore, ensejando nessas condições interpretativas, subjetividade por parte do fotointérprete.

Observou-se a existência de poucas e pequenas clareiras, caracterizadas por suas áreas escuras e periféricas às copas das árvores,

A área selecionada abrangeu apenas uma cobertura florestal e por isso não houve indícios de objetos ou de tipo de uso do solo com maior reflectância do que os topos das árvores.

Ocorreram alguns poucos agrupamentos de pixels na imagem, que representam copas de espécies nativas, próprias do processo de sucessão

secundária, atualmente existente no interior do reflorestamento.

Quanto à parte estrutural da floresta e ao conteúdo de informações contidas nas imagens a serem processadas, os aspectos acima mencionados são considerados importantes, pois evidenciam a possibilidade de sucesso no alcance dos objetivos dessa pesquisa, com aplicação da técnica LM, assim como na contagem das copas no processo interpretativo visual. Como se pode observar na Figura 3, quanto maior o valor de resolução e, portanto menor o tamanho do pixel (Tabela 1), mais detalhada se tornou a imagem resultante. Por conseguinte, a imagem de 600 dpi (Figura 3d) apresentou melhor nitidez quanto à definição das copas das árvores e sobre ela foi feita a interpretação visual que serviu de referência na análise comparativa, apoiada por informações amostrais de campo. As copas das árvores apresentaram menor nitidez nas imagens à medida que se diminui a resolução de digitalização. Exemplo disso é a observação na imagem digitalizada com 100 dpi de resolução, onde o contorno das copas não é facilmente traçado e a respectiva marcação dos topos das árvores seria feita com maior teor de subjetividade pelo fotointérprete.

Análise quantitativa

Trabalho de Campo

No trabalho de campo, efetuado em maio e junho de 2005, verificou-se que o reflorestamento apresentava três estratos diferentes. O estrato superior estava ocupado pelas copas das árvores de *Pinus elliottii*, cujas alturas variaram de 27 m a 36 m. O estrato logo abaixo do dossel estava ocupado por árvores provenientes do processo de regeneração natural, denotando-se na composição florística de espécies como os indivíduos jovens de *Araucaria angustifolia*, *Mimosa scabrella* (bracatinga), *Vernona* sp. (vassourão) e *Syagrus romanzoffiana* (coqueiro), com valores em altura não superiores a 18 m. No estrato mais inferior desse sub-bosque, os indivíduos do processo sucessional não ultrapassavam 5 m de altura, havendo, contudo, relativa facilidade de movimentação dentro da área, apesar de alguns locais mostrarem grande ocorrência de *Merostachya* sp. (taquara).

Verificou-se também que o caminho que separava o reflorestamento da mata nativa havia sido ocupado por espécies nativas e regenerações de *Pinus*. Em reflorestamentos bem manejados, esses caminhos são mantidos sem vegetação e viabilizam mais facilmente a orientação no local. Por isso, apesar da escala da fotografia aérea ser grande (1:4.000), durante o trabalho de campo não foi possível relacionar biunivocamente as copas de árvores na fotografia aérea e a respectiva posição no terreno. Como se observa na Figura 2, a borda que separa o reflorestamento da mata nativa é delineável, mas não a ponto de caracterizar copas específicas no campo.

A etapa de levantamento de campo, baseada em quatro amostras de tamanho individual de 25 m x 40 m correspondentes a 1% da área total estudada, resultaram em diversos parâmetros dendrométricos mensurados (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros biofísicos do povoamento de *Pinus elliottii*.

Table 3. (Biophysical parameters of the *Pinus elliottii* reforestation).

Parâmetro dendrométrico	Resultado de campo
Número médio de árvores/ha	165
Varição da circunferência a altura do peito	1,34 m a 1,93 m
Varição da altura total das árvores	27 m a 36 m
Varição da altura comercial	17 m a 27 m
Varição da copa* das árvores	9,2 m x 7,5 m (min.) até 11,1 m x 11,6 m (máx.)

* Mensuração da copa da árvore realizada na direção do eixo horizontal e vertical da parcela.

Tabela 4. Número de máximas intensidades obtidas no processamento digital.

Table 4. Number of local maximum points obtained from the digital processing.

Resolução	Número de máximas intensidades									
	7 x 7	9 x 9	11 x 11	13 x 13	15 x 15	17 x 17	19 x 19	21 x 21	23 x 23	25 x 25
100 dpi	820	504	384	296	--	--	--	--	--	--
200 dpi	--	--	--	816	680	600	494	--	--	--
300 dpi	--	--	--	--	--	--	807	710	632	581

A interpretação visual da fotografia aérea 70mm digitalizada com 600 dpi, permitiu o reconhecimento de 704 pontos correspondentes aos topos de árvores. Esse valor é 3% inferior ao total de árvores estimadas na fase de verificação em campo (726 indivíduos). É fato conhecido que na fotointerpretação florestal, a contagem de copas de árvores em fotografias aéreas resulta geralmente em um número inferior ao do campo (SPURR, 1960). Quanto maior a escala da fotografia aérea, maior é a precisão da contagem de copas de árvore (DISPERATI e SKALSKI JR, 1989). O baixo valor de erro obtido deve-se principalmente à escala grande da fotografia aérea, a uma moderada densidade de árvores e ao reflorestamento ter uma idade de plantio adulto, com suas árvores sobressaindo-se no dossel daquelas que compõem a regeneração natural existente no local.

Processamento das imagens digitais

As Tabelas 4 e 5 reportam o número de locais máximas quando aplicada nas três imagens digitalizadas e o respectivo tempo de processamento, perante a utilização de diferentes dimensões de filtros, respectivamente. É importante ressaltar que a análise desses valores de locais máximas encontradas, quando comparados com o valor de 704 copas pré-definido na interpretação da imagem digitalizada com 600 dpi, referencial desse estudo, serve para estabelecer o melhor tamanho do filtro em cada imagem processada, assim como a precisão final do mapeamento.

Na Tabela 4, verificou-se nas diferentes resoluções de digitalização, que quanto menor o tamanho do filtro utilizado, maior o número de pontos de locais máximas encontrados na imagem. Além disso, baseado nos tamanhos de filtro considerado, o intervalo de variação do número de máximas foi maior na resolução de 100 dpi do que nas imagens de 200 e 300 dpi.

Tabela 5. Tempo de processamento da técnica LM por variações nas dimensões do filtro.
Table 5. Processing time of the LM technique considering variations in the dimensions of the window filter.

Resolução	Tamanho do filtro (pixels)									
	7 x 7	9 x 9	11 x 11	13 x 13	15 x 15	17 x 17	19 x 19	21 x 21	23 x 23	25 x 25
100 dpi	35"	55"	75"	100"						
200 dpi				9'	10'	15'	20'			
300 dpi							35'	45'	50'	58'

O intérprete, por desconhecer o número de máximas resultantes na aplicação da técnica do LM, seleciona diversos tamanhos de filtros adequados à imagem considerada e os submete ao processamento digital. Os resultados numéricos dos processamentos evidenciarão o tamanho de filtro mais adequado para cada resolução de digitalização. Assim, pela Tabela 4 e considerando a resolução de digitalização 100 dpi, verifica-se a inutilidade de considerar os tamanhos do filtro [5 x 5] pixels e [15 x 15] pixels, visto que o total de máximas seria superior e inferior ao obtido pelos filtros [7 x 7] pixels e [13 x 13] pixels, respectivamente.

Independentemente da resolução da imagem digitalizada usada no processamento, quanto maior o tamanho do filtro, maior foi o tempo necessário de processamento (Tabela 5). Note-se que o tempo de processamento de uma imagem 300 dpi, utilizando o filtro [27x27] pixels, atingiria aproximadamente 1 hora, fornecendo um número de máximas inferior ao esperado pelas informações de referência (interpretação visual da imagem 600 dpi e mensuração em campo). Considerando-se tais resultados, em investigações que envolvam estudos de casos similares em povoamentos de coníferas, além da necessidade de considerar diversos tamanhos de filtro para cada resolução de digitalização, devem-se considerar também o tempo de processamento, pois este pode não ser adequado em muitas situações.

É importante mencionar que, no presente trabalho, o tempo de processamento deve ser observado com certa restrição, visto que o programa computacional usado para a determinação dos locais de intensidade máxima não estava otimizado e nem inserido dentro de um programa profissional de processamento de imagens. Nesses softwares profissionais, certamente o tempo de processamento da técnica seria reduzido.

Baseada na comparação do número de máximas locais resultantes do processamento e o número de árvores pré-estabelecidas na fase de interpretação visual (totalizando 704 árvores), uma síntese quantitativa foi realizada como forma de avaliar a acurácia do procedimento adota-

do. Erros de comissão (marcação de árvores não existentes ou marcadas erroneamente ou de múltiplos picos de radiância na copa individual da árvore) e de omissão (topo de árvore não marcado) complementam tal análise quantitativa.

A partir dessa síntese, observando-se os dados contidos nas Tabelas 4 e 5, optando-se por considerar como melhor exemplo um caso para cada trinômio “resolução/filtro/tempo de processamento”, alguns pontos devem ser observados.

A técnica LM em imagem 100 dpi processada com filtro [7x7] pixels resultou numa superestimativa de 16,5% na marcação do número de máximas locais, fato esperado em função do menor tamanho de janela considerado na análise, com um tempo de processamento bem reduzido (35 segundos). Os erros de comissão e omissão atingiram 23,0 % e 11,8%, respectivamente.

Na imagem 200 dpi processada com filtro [15x15] pixels com tempo de processamento de 10 min, a técnica LM permitiu a identificação de 3,4% menos pontos locais de máxima perante aqueles de referência derivados da fotointerpretação. O erro de comissão (10,2%) foi reduzido pela metade em comparação aquele oriundo da resolução de 100 dpi, citado anteriormente, havendo, porém um aumento quanto ao erro de omissão, atingindo o valor de 17,6%.

A técnica LM, aplicada na imagem 300 dpi e com filtro [21 x 21] pixels foi aquela que mais se aproximou (710 pontos de intensidade) do número de máximas locais marcadas na fotointerpretação (704 pontos), mas necessitando 4,5 vezes mais tempo de processamento do que na imagem de 200 dpi. Entretanto, esse significativo valor de desempenho (como aquele também obtido com o uso da imagem 200 dpi) não pode ser simplesmente tomado como ideal, pois não incorpora os erros de comissão (13,5%) e o de omissão (15,8%), considerando-se os 704 utilizados como referência.

A sua correta determinação fica assim apresentada: do total de 95 pontos de máximas referentes aos erros de comissão, 5 não correspondiam precisamente às árvores de *Pinus elliottii* obtidas na fotointerpretação, enquanto

76 expressaram uma segunda máxima local assinalada na mesma copa pela técnica LM e 14 expressaram a 2ª e a 3ª máxima. Desse modo, subtraindo-se daquele total de 710 pontos, os variados erros de comissão citados e ainda os erros de omissão (111 pixels, equivalentes a 15,8%), obtém-se o correto valor de 498 máximas, que dividido pelo total de 704 de máximas usadas como referência, permite estabelecer a acurácia geral de 70,7%. Tal valor encontrado mostra relativa concordância com aqueles expressos por WULDER *et al.* (2002), que em seus estudos utilizaram filtro de tamanho [3x3] pixels, reportando uma precisão geral de 67%.

Os erros de comissão mais expressivos foram os advindos de múltiplos picos de radiância na copa individual da árvore, sendo que os de três máximas foram poucos quando comparados com os de duas máximas (Figura 4). Como evidenciado no parágrafo acima para a resolução 300 dpi e com filtro [21 x 21] pixels, sete copas de árvores apresentaram três pontos de máxima, enquanto que 76 copas evidenciaram dois pontos de máxima. Este tipo de erro pode ser eliminado numa etapa posterior de pós-processamento, desde que haja o delineamento anterior das copas individuais das árvores na imagem digital.

O outro tipo de erro de comissão, marcação errônea de topo de árvores de *Pinus elliotti*, foi de baixo valor numérico e referente à marcação de copas do sub-bosque provenientes de regenera-

ção natural. Em povoamentos uniformes e sem ocorrência de sub-bosque este tipo de erro não ocorreria.

Um outro aspecto, pela experiência adquirida nesse trabalho, refere-se a áreas investigadas nas bordas das imagens processadas, visto que na aplicabilidade da técnica LM, por considerar o pixel central do filtro como fator comparativo com os demais pixels dentro da janela, o programa inicia o processamento para determinar os locais de máxima, algumas linhas após a primeira linha da imagem. Exemplificando, para tamanho de janela 9x9, o processamento inicia na quinta linha da imagem, o que pode ocasionar a perda de informação de alguns locais de máximas existentes nesse espaço considerado de borda da cena investigada. Nesse caso, uma alternativa para evitar que algumas copas não sejam devidamente investigadas e não tenham a indicação de máximas locais, poderia ser a utilização inicial de uma área mais abrangente na imagem a ser tratada, para posterior etapa de recorte digital após a aplicação de toda a técnica, em consonância com a definição das dimensões devidamente mensuradas em campo. Tal procedimento diminuiria o número de erros de omissão. Os erros de comissão, assim como também os erros de omissão, podem ocorrer em função do tamanho do filtro utilizado e a sua associação com as efetivas e variadas dimensões das copas das árvores, assim como as suas áreas periféricas sombreadas.

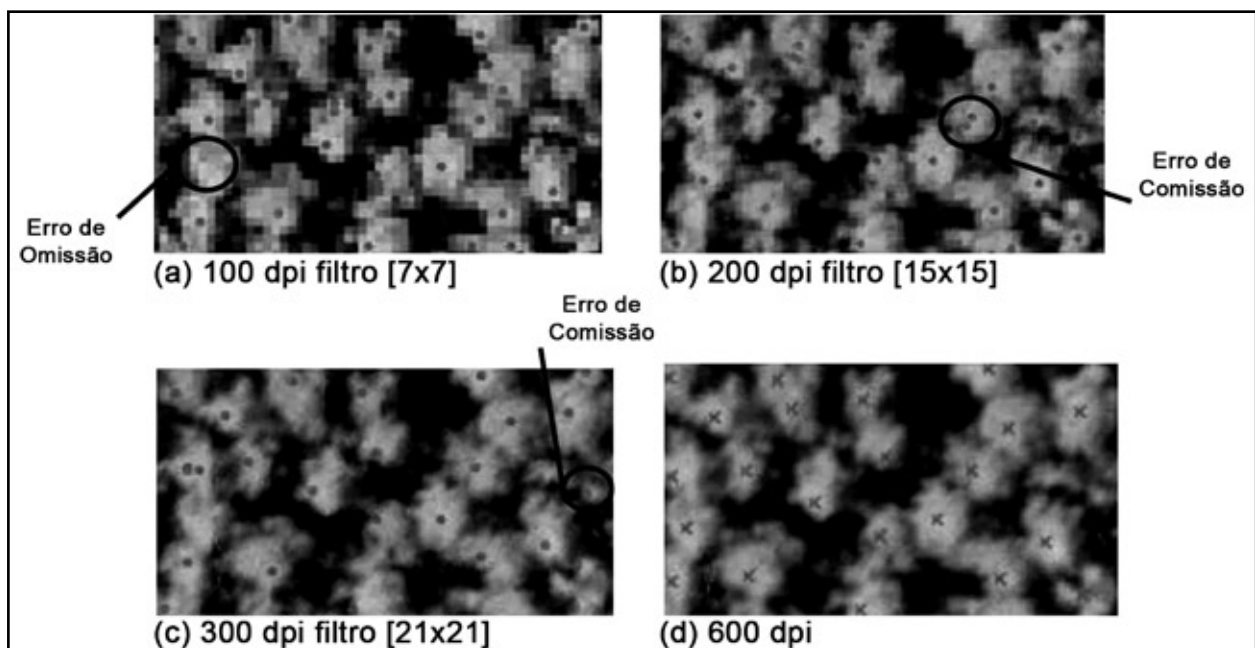


Figura 4. Erros de comissão e omissão resultantes da aplicação da técnica LM, sendo a imagem com: (a) 100 dpi; (b) 200 dpi; (c) 300 dpi; e (d) imagem-referência 600 dpi.

Figure 4. Commission and omission errors in the LM technique, being an image with: (a) 100 dpi; (b) 200 dpi; (c) 300 dpi; (d) reference- image with 600 dpi.

Um outro aspecto importante, de caráter interpretativo, que pode ficar bem ilustrado com os exemplos contidos na Figura 4, é a questão de definição dos contornos de copas individuais, relacionadas ao tamanho dos pixels (Tabela 1) da imagem, resultantes no caso das diversas resoluções de digitalização empregadas. Note-se que no presente estudo, utilizando fotografia aérea no formato analógico, na imagem digitalizada com resolução de 100 dpi (com tamanho do ERT próximo de 1m) ainda é possível delimitar a copa individual das árvores. Enfim, a escolha da resolução de digitalização, associada à questão da escala da fotografia aérea, também é um fator importante a considerar na aplicação da técnica LM.

Do ponto de vista de aplicação prática na área de inventário florestal e afim, os resultados obtidos na presente pesquisa são promissores, visto a possibilidade de marcação e conseqüente contagem do topo das coníferas, utilizando a técnica do LM em áreas reflorestadas. Experimentos adicionais devem ser feitos em reflorestamento da mesma e em outras espécies que apresentam uma dominância apical e em condições diversas, quer seja de espécies plantadas ou na forma de manejo adotada, e utilizando softwares profissionais e otimizados para melhor validação da capacidade dessa técnica.

CONCLUSÕES

Com os resultados provenientes da aplicação da técnica LM em parte de uma fotografia aérea colorida normal digitalizada pode-se inferir algumas conclusões.

A interpretação visual da fotografia aérea 70 mm digitalizada em 600 dpi permitiu, na área investigada, o reconhecimento de 704 pontos correspondentes aos topos de árvores, valor este 3% inferior ao total de árvores estimadas na fase de verificação em campo (726 indivíduos) e consideradas para determinar a acurácia do processamento.

Nas imagens processadas de 100, 200 e 300 dpi, quanto menor o tamanho da janela utilizada no processo de filtragem, maior foi o número de pontos de locais máximas encontradas e com o tempo de processamento proporcional ao tamanho do filtro usado.

Entre os quatro diferentes tamanhos de filtros testados nas três imagens processadas, os que proporcionaram os resultados mais próxi-

mos do referencial (704 copas) foi o filtro [7 x 7] pixels para 100 dpi, [15 x 15] pixels para 200 dpi e [21 x 21] pixels para 300 dpi, essa última combinação “filtro versus resolução” resultou na melhor acurácia de identificação das copas, com valor de 70,7%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos acadêmicos do Curso de Engenharia Florestal Gerson dos Santos Silva, Thiago Stepha e Enerson Cruzianini pela ajuda na realização do trabalho de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CULVENOR, D. S.; COOPS, N.; PRESTON, R.; TOLHURST, K. G. A spatial clustering approach to automated tree crown delineation. In: INTERNATIONAL FORUM ON AUTOMATED INTERPRETATION OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL IMAGERY FOR FORESTRY, Victoria, February 10-12, 1998. **Proceedings**. Victoria: Canadian Forest Service, 1999. p.67-80.

DISPERATI, A.A.; OLIVEIRA FILHO, P.C. Delineamento de copas de árvores em fotografias aéreas de alta resolução, através de suas sombras periféricas: estudo de caso na floresta ombrófila mista. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.125-202, 2005.

DISPERATI, A.A.; SKALSKI JUNIOR, J. Contagem de copas de pinheiro do Paraná em fotografias aéreas verticais (convencionais e 35 mm coloridas): caso estudo do Capão da Imbuia, Curitiba, PR. **Floresta**, Curitiba, v.19, n.1/2, p.4-14, 1989.

DISPERATI, A.A.; NEEF, T.; BERNARDI, D.; SANTOS, J.R.; OLIVEIRA-FILHO, P.C. Experiências iniciais na utilização da técnica “local maximum filtering” em fotografias aéreas de alta resolução para a determinação do topo das árvores. In: DISPERATI, A.A.; SANTOS, J.R. (Ed.). **Aplicações de geotecnologias na engenharia florestal**. Curitiba: Copiadora Gabardo, 2004. p.275-276.

GOUGEON, F.A. Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system. In: INTERNATIONAL FORUM ON AUTOMATED INTERPRETATION OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL IMAGERY FOR FORESTRY, Victoria, February 10-12, 1998. **Proceedings**. Victoria: Canadian Forest Service, 1999. p. 11-23

- GOUGEON, F.A. Towards semi-automatic forest inventories using individual tree crown (ITC) recognition. **Technology Transfer Note**, Victoria, n.22, p.1-6, 2000.
- GOUGEON, G.A.; LECKIE, D.G. Forest information extraction from high spatial resolution images using an individual tree crown approach. **Information Report BC-X**, Victoria, n.396, p.1-26, 2003.
- KINI, A.U.; POPESCU, S.C. Trewav: a versatile tool for analyzing forest canopy lidar data: a preview with an eye towards future. In: AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, September 12-16, 2004, Kansas City. **Images to decision**. Kansas City: Remote Sensing Foundation for GIS Applications, 2004. 9p. Disponível em: <http://wwwssl.tamu.edu/personnel/sopescu/TreeVaW/Publications/Kini&Popescu.pdf>. Acesso em: 24 março 2005.
- NEEFE, T.; BIGING, G.S.; DUTRA, L.V.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R. Modeling spatial tree pattern in the Tapajós Forest using interferometric height. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.57, n.1, p.1-6, 2005.
- PERIN, G.; DESCOMBES, X.; ZERUBIA, J. Tree crown extraction using marked point processes. In: EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, Vienna, 2004. **Proceedings**. Vienna: University of Technology, 2004. 4p. Disponível em: http://www.sop.inria.fr/ariana/personnel/Guillaume.Perrin/DOWNLOADS/eusipco_paper.pdf. Acesso em: 24 março 2005.
- PITKÄNEN, J.; MALTANO, M.; HYYPPÄ, J.; YU, X. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, Freiburg, 3-6 October, 2004. **Laser-scanners for forest and landscape assessment**. Freiburg, 2004. p.187-191. [CDROM].
- POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H. Seeing the trees in the forest: using Lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, Falls Church, v.70, n.5, p.589-604, 2004.
- SPURR, S.H. **Photogrammetry and photo-interpretation with a section on applications to forestry**. 2.ed. New York: The Ronald Press, 1960. 467p.
- WULDER, M.; NIEMANN, K.O.; GOODENOUGH, D.G. Error reduction methods for local maximum filtering of high spatial resolution imagery for locating trees. **Canadian Journal Remote Sensing**, Ottawa, v.28, n.5, p.621-628, 2002.
- WULDER, M.; NIEMANN, K.O.; GOODENOUGH, D.G. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**. New York, v.73, n.1, p.103-114, 2000.
- WULDER, M.; NELSON, T.; NIEMANN, D.; SEMANN, D.; GOODENOUGH, D.G.; DYK, A.; BHOGAL, A.S. P. Individual tree recognition from multiple high spatial resolution image sources. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1., 2001, Sydney. **Proceedings**. Sydney: University of New South Wales, 2001. v.2, p.771-773 [CD-ROM]. Disponível em: http://rseng.cs.uvic.ca/DaveIEEEpub/IGARSS01_3.pdf. Acesso em: 23 março 2005.

Recebido em 17/04/2007

Aceito para publicação em 14/11/2007