

Determinação do volume de madeira empilhada através de processamento de imagens digitais

Determination of the volume wooden stacked
through processing of digital images

Márlon Crislei da Silva
Vicente Paulo Soares
Francisco de Assis Carvalho Pinto
Carlos Pedro Boechat Soares
Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro

RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia para segmentação de toras de madeira com a finalidade de cubagem de árvores abatidas, por meio de fotografias digitais. Ela fornece o valor do volume da pilha fotografada em estéreo, o fator de empilhamento e o seu volume em metros cúbicos. No desenvolvimento da metodologia foram utilizadas uma câmera digital Kodak DC 210 e 15 pilhas de madeira de eucalipto, montadas no setor de Silvicultura do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, município de Viçosa, MG. Testes de validação da metodologia (comparação dos valores obtidos pela metodologia proposta e pelos valores de referência) apontaram um desvio médio inferior a 2,0% no cálculo do volume real (em metros cúbicos) da pilha, de 1,0% na determinação do volume em estéreo e de 1,5% na determinação do fator de empilhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Empilhamento de madeira, Processamento de imagem digital, Volume sólido, Volume estéreo, Fator de empilhamento

ABSTRACT: This paper presents a methodology for wood logs segmentation with the purpose of tree cubage using digital photography. It provides the volume in stereo, piling factor, and the respective volume in cubic meters. It was used a Kodak DC 210 digital camera and 15 stacks of *Eucalyptus* wood mounting in Department of Forest Engineering, Silviculture Sector, Federal University of Viçosa, Brazil. Validation tests pointed out with a mean deviation less than 2.0% in the calculation of the real pile volume, 1.0% in the determination of the volume in stereo and 1.5% in the determination of the piling factor.

KEYWORDS: Digital image processing, Solid volume, Stereo volume, Piling factor

INTRODUÇÃO

A dendrometria é um ramo da ciência florestal que trata da medição de árvores, tanto do ponto de vista individual quanto do coletivo (CAMPOS, 1993). Em dendrometria, o termo cubagem ou cubicagem designa o cálculo do volume do material lenhoso de uma árvore, uma pilha ou um povoamento florestal, sendo utilizados, para tanto, métodos de medição direta, indireta, estimativa equacional, entre outros.

Em virtude da crescente valorização da madeira como matéria-prima e como produto, a busca de estimativas precisas de volumes de madeira tem ganhado destaque e importância. Desta forma, inventários florestais são executados com o objetivo de fornecer tais estimativas, as quais podem ser traduzidas como a quantidade de madeira por unidade de área, bem como a sua distribuição dentro desta área. Deve-se ressaltar,

contudo, que, após a colheita, as estimativas são obtidas com base em pilhas de madeira confeccionadas no campo, nos caminhões ou nos pátios das fábricas, a partir das quais, os volumes em metro cúbico e em metro estéreo são mensurados (BERTOLA, 2002).

A preocupação das empresas florestais é crescente no que diz respeito à determinação do volume de pilhas de madeira em metro estéreo e a sua conversão em metro cúbico, uma vez que esta unidade de avaliação é utilizada pelas empresas em conversões da quantidade de madeira em produtos como carvão e celulose. Isto aumenta a necessidade de maior precisão, posto que, estimativas de volume de pilhas de madeira obtidas com baixa precisão, podem gerar resultados imprecisos e estes, por sua vez, poderão ensejar prejuízos econômicos para as empresas (BERTOLA, 2002).

Em toda empresa madeireira é fundamental o controle volumétrico de seu produto depois de derrubada, o qual, na maioria das vezes, é depositado em feixes de mesmo comprimento e mensurado no solo, em balanças, ou no próprio caminho de transporte.

Em busca da otimização no processo de recebimento e pagamento de madeira, empresas têm testado métodos que possibilitem uma máxima precisão nas determinações de volume, com rapidez e baixo custo operacional.

Tradicionalmente, a madeira tem sido avaliada através do seu volume, e, para tanto, têm sido utilizados variados métodos, de caráter subjetivo, que visam obter, a partir da medição manual do volume envolvente da carga da madeira, o volume aparente, o correspondente volume real e o volume sólido, obtido teoricamente do primeiro, através do desconto sistemático de todos os espaços vazios existentes entre os toros de madeira que constituem uma carga.

Um método alternativo de determinação do volume de madeira abatida consiste na pesagem do caminhão transportador, com e sem a carga de madeira. O peso da madeira obtido constitui um valor de utilização bastante discutível, dada a importante variação que se verifica na massa específica da madeira em função do seu teor de umidade (CARVALHO *et al.*, 1992).

Revelados alguns problemas nos métodos manuais, surge a necessidade de automatização desta tarefa. Uma forma de concretização deste ideal seria o desenvolvimento de um sistema baseado em análise de imagem digital, cuja princi-

pal vantagem é o fato de minimizar a intervenção do operador, sistematizando o processo de medição e possibilitando um maior rigor e rapidez na mensuração da amostra.

Uma outra proposta para o cálculo do volume de madeira empilhada seria o uso de fotografias tomadas perpendicularmente à face da pilha, para obtenção do fator de empilhamento e posterior cálculo de seu volume. Como medida de aprimoramento da metodologia supracitada, tem-se o uso de técnicas de processamento de imagens digitais.

Para viabilizar esta automação, torna-se necessária uma satisfatória segmentação das seções das toras na imagem, sendo indispensável que o aplicativo efetue a distinção, na fotografia digital, entre a madeira e os demais constituintes da cena.

A segmentação de imagens é um processo de divisão da imagem em segmentos com atributos uniformes, interpretados como um conjunto de pixels que satisfazem a certas condições de adjacência e similaridade (ANDRADE *et al.*, 1994), o que significa dizer que a segmentação visa subdividir uma imagem em suas partes ou objetos constituintes (GONZALEZ e WOODS, 1992).

O resultado da segmentação é também uma imagem, porém observa-se que os valores dos pixels dessa nova imagem representam as informações desejadas realçadas, normalmente separando um objeto ou mais de seu fundo (resultando imagens binárias).

Uma das técnicas para segmentação de imagens é a limiarização, utilizada, especialmente, quando os valores dos pixels apresentam uma distribuição bimodal e o objetivo é uma imagem binária. A eficácia do emprego desta técnica em sistemas de visão artificial é limitada, em virtude da variação observada na iluminação. Nessas condições, o limiar utilizado para agrupar os pixels pertencentes a um mesmo objeto deve ser dinâmico, ou o sistema deve utilizar técnicas capazes de minimizar os efeitos da variação de intensidade luminosa, permitindo trabalhar-se com um valor previamente definido (SENA JÚNIOR, 2002).

Contudo, em se tratando de ambientes em que não há controle de iluminação, o sistema deve ser robusto o suficiente para adaptar-se às dificuldades impostas por esta característica, sendo que, neste trabalho, optou-se por uma forma de limiarização dinâmica.

O objetivo do presente trabalho foi a investigação da adequação de algoritmos de segmentação de imagens digitais de pilhas de toras de

madeira, para determinar o volume real de madeira contido nas pilhas, bem como o fator de empilhamento e o volume estéreo, tendo por base fotografias tomadas em ambiente de luminosidade não controlada.

MATERIAL E MÉTODOS

Para os testes de campo foram montadas 15 pilhas de madeira de *Eucalyptus grandis* de valores volumétricos próximos, empilhadas manualmente no setor de Silvicultura da Universidade Federal de Viçosa (UFV), município de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

As pilhas foram estruturadas utilizando uma quantidade de toras suficientes de tal maneira que nenhuma pilha tivesse o mesmo volume, o mesmo tamanho, nem as mesmas toras. Foram construídas pilhas de aproximadamente 3,0 metros de comprimento (C) e altura máxima (H) de 2,0 metros, sustentadas por estacas de madeira, as quais serviram, também, de apoio para as toras. A largura da pilha (L) correspondeu ao comprimento médio das toras, que foi de, aproximadamente, 1,0 metro (Figura 1). Destaque-se que, uma vez que o comprimento médio das toras não se afigura como uma variável de interferência na avaliação da metodologia, optou-se por adotar um valor que facilitasse a montagem das pilhas, embora estando este abaixo do comumente utilizado nas empresas de extração madeireira.

Em cada pilha foram obtidos o volume real (m^3), através de cubagem rigorosa, e o volume aparente ou volume em estéreo (st). A partir destes dados, derivou-se o fator de empilhamento, tido como verdade de campo.

As pilhas foram posteriormente fotografadas com uma câmera digital com o observador posicionando-se a 3,0 metros de cada face de corte para subsequente análise, totalizando, desta forma, 30 imagens.

Foi utilizada para a tomada de fotos uma câmera digital Kodak DC 210 não métrica com "flash" embutido, gravando as imagens em formato bit-map, com resolução máxima de 1.152x864 dpi.

A resolução espacial média das imagens de todas as pilhas foi de 3,75 milímetros, ou seja, cada pixel da imagem estava representando uma área aproximada de 14 mm² de face de madeira.

Todos os procedimentos metodológicos foram implementados no ambiente de trabalho Matlab

(versão 6). A escolha deste aplicativo deveu-se, dentre outros condicionantes, ao fato de toda imagem tratada algorítmicamente ser representada como uma matriz e tal programa já trabalhar com matrizes de maneira nativa, isto é, já possuir mecanismos (rotinas, métodos, algoritmos, estruturas) para manipulação de matrizes.



Figura 1.
Esquema de montagem das pilhas de madeira.
(Wood stack scheme)

A metodologia proposta parte do princípio de que uma vez conhecendo a resolução espacial da imagem e o número de pixels da imagem correspondente à madeira, pode-se facilmente obter o valor de área da face de madeira fotografada. De posse deste valor, e sabendo-se o comprimento das toras, pode-se, então, estimar o valor volumétrico da pilha.

No entanto, para a obtenção do número de pixels da imagem correspondentes à madeira faz-se necessária a segmentação da imagem, ou seja, a perfeita distinção entre espaços vazios entre as toras, cenário de fundo, e pixels preenchidos por material lenhoso.

A utilização do sistema inicia-se com a entrada da imagem da pilha, ou parte dela. Após a entrada desta imagem sob a forma matricial, o sistema a converte numa imagem monocromática, que, por conveniência, corresponde a uma imagem índice de realce dos objetos de interesse. Essa é uma técnica bastante utilizada em sistemas de visão artificial e processamento de imagens do sensoriamento remoto.

Diversos índices são amplamente utilizados na área de sensoriamento remoto, no intuito de reduzir a diferença de brilho, em materiais idênticos, causados por diferenças no relevo do terreno, sombras ou mudanças sazonais no ângulo e intensidade da iluminação solar. Além disso, a utilização desses índices permite realçar características de interesse e reduzir, em imagens mul-

tiespectrais, o número de bandas necessárias à interpretação, concentrando a informação (JENSEN, 1996).

Destaca-se como o índice mais conhecido e utilizado para estudos de caracterização e monitoramento da vegetação o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) desenvolvido por Rouse et al. (1974). Cita-se também DVI (TUCKER, 1979), o “Weighted Vegetation Index” (WDVI) (CLEVERS, 1989) e o “Soil-Adjusted Vegetation Index” (SAVI) (HUETE, 1988).

No presente trabalho as feições de interesse para destaque são as faces das madeiras que tornam melhor o desempenho do sistema, na medida em que ficam mais distintas do fundo escuro verificado entre elas. Devido à coloração típica do eucalipto ser próxima ao marrom, optou-se por um índice de excesso de vermelho, ficando a imagem índice da seguinte forma:

$$I = (5 * BR + 1 * BG + 1 * BB) / 7;$$

Sendo: I = imagem índice de excesso de vermelho monocromática;

BR = banda vermelha da composição RGB;

BG = banda verde da composição RGB;

BB = banda azul da composição RGB.

De posse da imagem em tons de cinza, o próximo passo compreendeu a limiarização da imagem com a finalidade de segmentação e obtenção de uma imagem binária. O sistema deve buscar um limiar para cada pilha analisada, uma vez que a proposta deste trabalho compreendeu a criação de uma metodologia para cubagem por fotografia digital tomada em ambiente “não controlado”, ou seja, para locais diversificados. Utilizou-se o método de determinação dinâmica de limiar iterativo (RIDLER e CALVARD, 1978).

O princípio do método de seleção iterativa é bastante simples e pressupõe a existência de um valor médio para os pixels do fundo e os de primeiro plano (ou pixels do objeto requerido) e que este valor pode ser alcançado calculando iterativamente a média ponderada entre os valores dos pixels do fundo e os de primeiro plano (RIDLER e CALVARD, 1978). Em outras palavras, o método assume que o limiar se encontra no valor de brilho que faz com que o histograma seja dividido em duas partes iguais segundo uma média ponderada.

O algoritmo para seleção iterativa pode ser descrito da forma seguinte:

- Assumindo que o intervalo de níveis de cinza da imagem seja $[0..nc]$ (lembrando que normalmente trabalha-se com imagens de 8 bits, ou seja, $nc+1=2^8=256$);
- Iniciar $tc=nc$ e $i=0$;
- Enquanto $i \leq tc$ e também $\leq nc$ faça:

$$- \text{Soma_PlanoFundo} = \sum_{m=0}^i m * \text{histograma}(m);$$

$$- \text{Histograma_PlanoFundo} = \sum_{m=0}^i \text{histograma}(m);$$

$$- \text{Soma_PrimeiroPlano} = \sum_{m=i+1}^{nc} m * \text{histograma}(m);$$

$$- \text{Histograma_PrimeiroPlano} = \sum_{m=i+1}^{nc} \text{histograma}(m);$$

$$- tc = \frac{\text{Soma_PlanoFundo}}{\text{Histograma_PlanoFundo}} + \frac{\text{Soma_PrimeiroPlano}}{\text{Histograma_PrimeiroPlano}}$$

2

- Acrescer i de 1;
- Fim

O limiar ótimo (tc) será o limiar final (T) calculado. Este corresponderá ao nível que oferecerá a máxima separação entre a média da escala de cinza do primeiro plano e a do plano de fundo (YANG et al., 2000).

Uma vez obtido o limiar T, a imagem é então binarizada, segundo regra abaixo, sendo $g(x,y)$ a imagem binária e $f(x,y)$ o nível de cinza do ponto (x,y) :

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{se } f(x,y) \geq T \\ 1, & \text{se } f(x,y) < T \end{cases}$$

A Figura 2 ilustra a binarização de uma pilha por meio da técnica de limiarização.

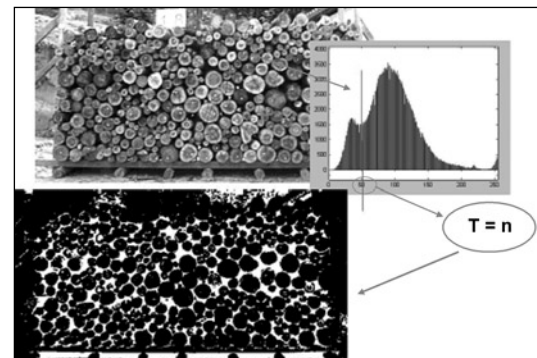


Figura 2. Seqüência de operações para binarização da imagem. (Operation sequence for image binarization)

Conforme visualizado na Figura 2, mesmo após a binarização, as faces das toras não estão totalmente segmentadas. A limiarização significou apenas uma etapa na segmentação.

Na seqüência, a imagem binária foi submetida a uma próxima etapa onde o usuário intervém de forma interativa, por meio de um cursor sobre a imagem.

Nesta fase, o operador introduz pontos indicadores dos limites da carga, através da manipulação interativa de um cursor móvel sobre a imagem. A união destes pontos gera um polígono delimitador da carga na imagem, permitindo, ao sistema a esperada segmentação da imagem, para posterior cálculo volumétrico. Uma vez delimitada a pilha, o aplicativo é capaz de proceder ao cálculo da área da face da pilha, que se converterá em volume estéreo da mesma, ainda em unidades de desenho, que, posteriormente, podem ser facilmente convertidas em metros cúbicos, utilizando a resolução calculada da imagem. A Figura 3 ilustra esta operação.

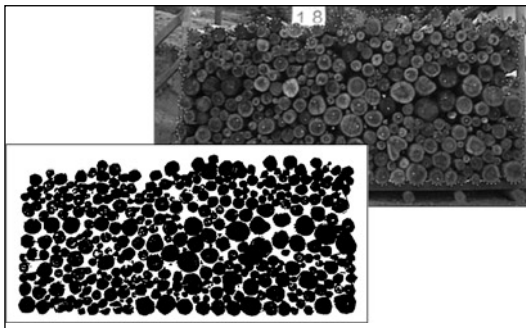


Figura 3. Delimitação da pilha de forma manual. O aplicativo captura o polígono delimitado pelo operador e recorta, na imagem binarizada, a pilha de interesse.

(Pile manual delimitation. The software captures the polygon delimited by operator and cut out the pile of interest in the binary image)

Embora seja mantida neste processo manual a subjetividade inerente à delimitação correta do contorno envolvente da pilha, o mesmo ainda constitui uma alternativa eficaz que simplifica o processo tradicional para obtenção do volume em estéreo.

De posse da pilha binarizada, é facultado ao usuário a determinação do fator de empilhamento. O fator de empilhamento pode ser expresso por:

$$F_e = \frac{\text{Volume empilhado (st)}}{\text{Volume sólido (m}^3\text{)}} = \frac{\text{Área total da pilha}}{\text{Soma da área das toras}}$$

Desta forma, o aplicativo efetua o cálculo das áreas do polígono delimitado e dos objetos (toras) segmentados, procede à divisão e exibe o fator de empilhamento.

Resolução espacial representa a medida real de uma cena correspondente a um pixel na imagem. Para a determinação da resolução das imagens, com a finalidade de conversão de unidades digitais de volume em metros cúbicos, o sistema utiliza um objeto de comparação de dimensões conhecidas junto à pilha.

No caso específico deste trabalho, a resolução citada é correspondente à face da pilha analisada, uma vez que esta propriedade da imagem é função direta da distância verificada entre o objeto e o sensor, o que ressalta a importância do objeto de comparação estar situado na mesma direção que a face da pilha.

O objeto de comparação acima citado nada mais é que uma peça de dimensões conhecidas, utilizada para o cálculo da resolução da imagem, podendo ser a carroceria do caminhão, estacas delimitando o limite da pilha, ou uma baliza. Nas fotografias experimentais a distância linear de comparação foi obtida pelas estacas de contenção da pilha.

Destaque-se que o sistema desenvolvido no ambiente Matlab fornece ao usuário a possibilidade de intervenção interativa na segmentação da imagem, após o processamento acima descrito. Para tanto, por meio do cursor sobre a imagem é permitido o apontamento de toras que foram erroneamente assinaladas ou que foram ignoradas e, posteriormente, o aplicativo recalcula os valores volumétricos ou o fator de empilhamento requeridos.

A fim de avaliar a qualidade dos resultados obtidos pela metodologia aplicada, foi calculado o desvio percentual entre os valores estimados e os valores medidos dos volumes das pilhas (em estéreo e sólido) e fatores de empilhamento, pela seguinte equação:

$$\text{Desvio}(\%) = \frac{(\text{Valor obtido pelo aplicativo}) - (\text{Valor obtido pela medição manual})}{\text{Valor obtido pela medição manual}} * 100$$

Foram capturadas trinta imagens, e esta repetição permitiu uma análise estatística dos resultados

verificados, tendo sido calculado o coeficiente de determinação (R^2) para os dados destas pilhas.

O coeficiente de determinação fornece uma informação quantitativa da adequação dos valores estimados aos valores medidos.

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQTotal}$$

em que:

SQ Reg = soma de quadrados de valores estimados;

SQ Total = soma total dos quadrados.

O valor de R^2 varia no intervalo de 0 a 1. Valores próximos de 1 indicam uma grande adequação da metodologia para obtenção dos valores a que se propõe.

Utilizou-se, também, para análise dos resultados, o teste estatístico de identidade proposto por Leite e Oliveira (2002). Este é um procedimento estatístico eficiente na análise da identidade entre dois vetores de grupos de dados quantitativos. É resultante da combinação do teste “F”, modificado por Graybill em 1976, do teste “t” para o erro médio e da análise do coeficiente de correlação linear. Com base nestas informações foram propostas regras de decisão para testar hipóteses de significância entre os dois vetores analisados, correspondentes, no presente trabalho, aos dados estimados pela metodologia e aos valores medidos manualmente, tidos como referência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1, 2 e 3 a seguir apresentam os resultados de volume aparente, fator de empilhamento e volume sólido, verificados para as quinze pilhas experimentais, por cubagem rigorosa e pelo uso de fotografias digitais associadas à metodologia proposta, bem como sua comparação, tomando os valores obtidos a partir de cubagem rigorosa como valor de referência.

A análise da Tabela 1 mostra que os desvios tiveram variação máxima de 2,07% e um desvio médio de 0,54% na determinação do volume aparente (em estéreo).

Da mesma forma, procedeu-se à determinação do fator de empilhamento pelo aplicativo e em seguida comparou-se aos valores encontrados da razão entre volume da pilha obtido pela cubagem rigorosa e o volume aparente da pilha extraído da medição direta da pilha (Tabela 2).

No cálculo do fator de empilhamento observou-se um desvio médio de 0,91%.

Finalmente, no cálculo do volume sólido da pilha em metros cúbicos, observou-se um desvio de 0,27% da média dos valores obtidos para o volume sólido em m^3 calculados de forma manual e utilizando o aplicativo. Os valores obtidos para as pilhas são apresentados na Tabela 3.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os diagramas de dispersão indicando as associações entre as variáveis obtidas com uso do aplicativo e os valores de referência obtidos por medição manual, considerando individualmente as trinta fotos tomadas.

Tabela 1.

Volume em estéreo obtido por meio do aplicativo, comparado à mensuração manual.

(Stereo volume obtained from the software and by the manual mensuration)

Pilha	Face	Volume em Estéreo		
		Medição Direta (M^3)	Aplicativo (M^3)	Desvio (%)
1	A	3,360	3,4190	1,75
	B	3,459	3,4614	0,06
2	A	3,663	3,6275	-0,97
	B	3,744	3,7102	-0,90
3	A	3,432	3,4360	0,12
	B	3,423	3,4556	0,95
4	A	3,684	3,6342	-1,35
	B	3,78	3,7338	-1,22
5	A	3,645	3,6858	1,12
	B	3,813	3,8313	0,48
6	A	3,771	3,7246	-1,23
	B	3,843	3,8107	-0,84
7	A	3,618	3,6928	2,07
	B	3,708	3,7451	1,00
8	A	3,657	3,6367	-0,56
	B	3,705	3,7322	0,73
9	A	3,705	3,7190	0,38
	B	3,819	3,8937	1,96
10	A	4,041	4,0477	0,17
	B	4,173	4,1229	-1,20
11	A	3,747	3,7403	-0,18
	B	3,864	3,8739	0,26
12	A	3,627	3,6220	-0,14
	B	3,789	3,7740	-0,40
13	A	3,861	3,8338	-0,70
	B	3,792	3,8190	0,71
14	A	3,612	3,6624	1,40
	B	3,663	3,6730	0,27
15	A	3,597	3,5616	-0,98
	B	3,645	3,6446	-0,01

Tabela 2.

Fator de empilhamento obtido por meio do aplicativo, comparado aos valores obtidos por cubagem rigorosa.

(Piling factor obtained from the software and by the manual mensuration)

Pilha	Face	Fator de Empilhamento		Desvio (%)
		Cubagem Rigorosa	Aplicativo	
1	A	1,3641	1,3455	-1,36
	B	1,4043	1,4039	-0,02
2	A	1,3517	1,3627	0,81
	B	1,3816	1,3955	1,01
3	A	1,3065	1,2937	-0,98
	B	1,3031	1,3169	1,06
4	A	1,3328	1,3257	-0,53
	B	1,3675	1,3229	-3,26
5	A	1,3018	1,3300	2,17
	B	1,3618	1,3745	0,93
6	A	1,3004	1,3298	2,26
	B	1,3252	1,3218	-0,26
7	A	1,2874	1,2924	0,39
	B	1,3194	1,3864	5,08
8	A	1,2913	1,3077	1,27
	B	1,3082	1,3231	1,14
9	A	1,2771	1,3070	2,34
	B	1,3164	1,3240	0,58
10	A	1,2871	1,3392	4,05
	B	1,3291	1,3159	-0,99
11	A	1,2768	1,2952	1,44
	B	1,3167	1,3107	-0,46
12	A	1,2752	1,2886	1,05
	B	1,3322	1,3156	-1,25
13	A	1,3464	1,3588	0,92
	B	1,3224	1,3142	-0,62
14	A	1,2796	1,2971	1,37
	B	1,2977	1,2902	-0,58
15	A	1,2715	1,2951	1,86
	B	1,2884	1,2844	-0,31

Analisando a Figura 4 observa-se uma alta correlação existente entre as variáveis, dada a proximidade dos pontos da reta $x=y$, demonstrando uma boa precisão oferecida pelo aplicativo para o cálculo de volume em estêreo. O coeficiente de determinação (R^2), que representa a porcentagem da variação em Y (volume obtido pelo aplicativo), a qual seria explicada pela equação de regressão, foi de 97,7%. Para o fator de empilhamento (Figura 5), o coeficiente de determinação foi de 79,0%. Percebe-se pela Figura 5 uma leve tendência de superestimação para o fator de empilhamento obtido pelo aplicativo.

Tabela 3.

Volumes sólido (m^3) das pilhas obtidos por meio do aplicativo, comparados aos valores obtidos por cubagem rigorosa.

(Solid volumes (m^3) obtained from the software, compared to those obtained by tree cubage)

Pilha	Face	Cubagem Rigorosa(M^3)	Aplicativo (M^3)	Desvio (%)
B	2,3738	-3,63		
Média			2,4228	-1,64
2	A	2,7099	2,6620	-1,77
	B		2,6926	-0,64
Média			2,6773	-1,20
3	A	2,6269	2,6888	2,36
	B		2,6573	1,16
Média			2,6731	1,76
4	A	2,7641	2,8554	3,30
	B		2,8586	3,42
Média			2,8570	3,36
5	A	2,7999	2,8356	1,28
	B		2,8231	0,83
Média			2,8294	1,05
6	A	2,8999	2,8293	-2,44
	B		2,8830	-0,58
Média			2,8562	-1,51
7	A	2,8103	2,8873	2,74
	B		2,6300	-6,42
Média			2,7587	-1,84
8	A	2,832	2,8156	-0,58
	B		2,8568	0,88
Média			2,8362	0,15
9	A	2,901	2,8810	-0,69
	B		2,9763	2,60
Média			2,9287	0,95
10	A	3,1397	3,0723	-2,15
	B		3,1731	1,06
Média			3,1227	-0,54
11	A	2,9347	2,8903	-1,51
	B		2,9935	2,00
Média			2,9419	0,25
12	A	2,8442	2,8459	0,06
	B		2,9036	2,09
Média			2,8748	1,07
13	A	2,8675	2,8568	-0,37
	B		2,9058	1,34
Média			2,8813	0,48
14	A	2,8227	2,8589	1,28
	B		2,8828	2,13
Média			2,8709	1,71
15	A	2,829	2,7844	-1,58
	B		2,8738	1,58
Média			2,8291	0,004

O cálculo do volume sólido também apresentou boa performance, conforme visto na Figura 6, com um coeficiente de determinação igual a 92,3%.

Conforme estudos de Leite e Oliveira (2002), o coeficiente de determinação, isoladamente, não basta para testar eficientemente a identidade dessas variáveis. Foi aplicado o método estatístico proposto pelos mesmos autores para teste de identidade entre os volumes sólidos, fatores de empilhamento e volume em estéreo obtidos por cubagem rigorosa e pelo aplicativo. Concluiu-se

que os valores obtidos pela metodologia proposta para volume sólido, fator de empilhamento e volume em estéreo foram estatisticamente diferentes dos valores obtidos por cubagem rigorosa e medição manual, ao nível de significância de 1%.

Deve-se ressaltar que algumas fotografias das pilhas apresentaram problemas de sombreamento, os quais foram amenizados com uso da ferramenta de correção manual das toras, disponibilizado pelo aplicativo, através da indicação, pelo cursor, sobre dois pontos da borda da tora.

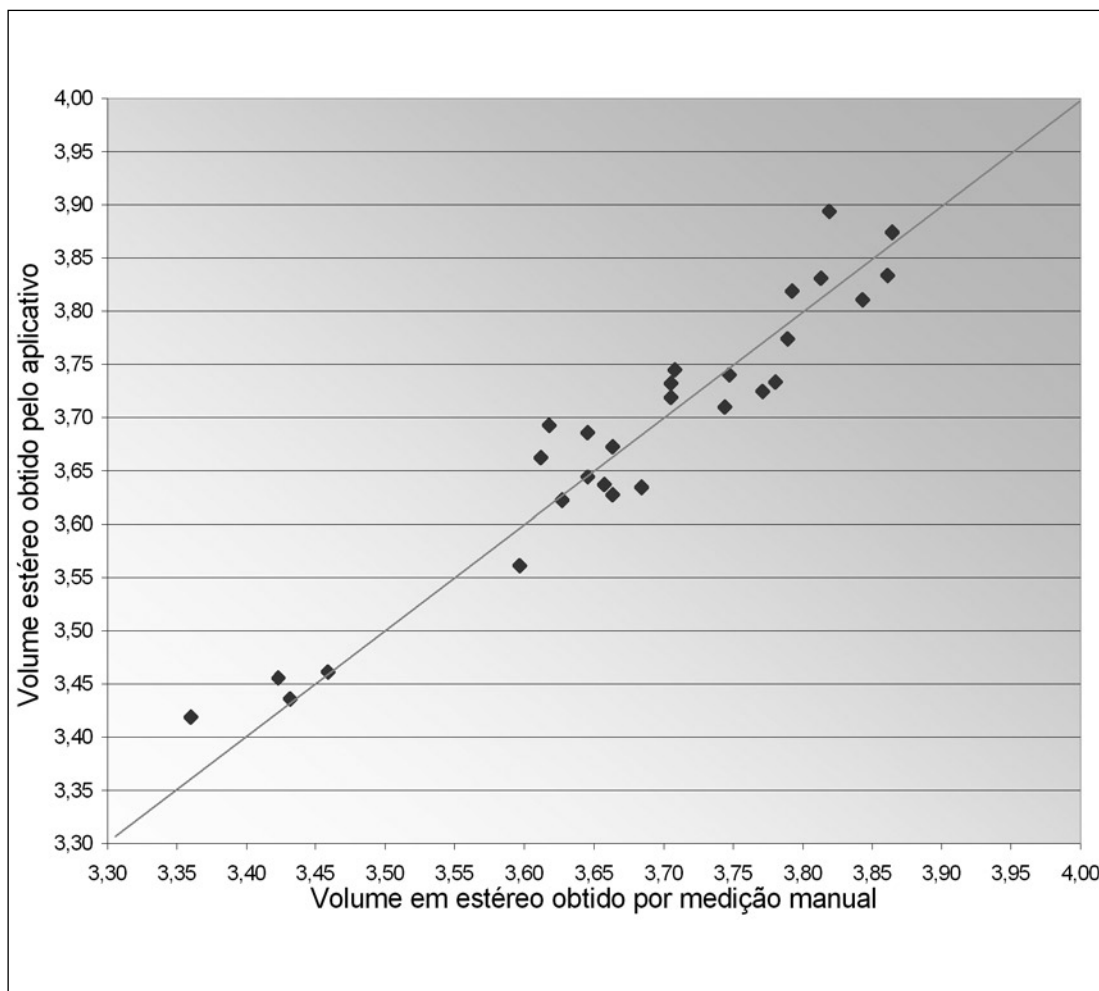


Figura 4.

Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis volume em estéreo calculado pelo aplicativo e volume estéreo de referência obtido por medição manual.

(Dispersion diagram presenting the association between variable volume in stereo calculated by the application and stereo volume of reference obtained by manual mensuration)

Loetsch *et al.* (1973), citados por BERTOLA (2002), apresentam um sistema que emprega um circuito interno de televisão, dotado de um “contador” eletrônico que distingue material lenhoso de espaços vazios, e assim determina o fator de empilhamento. A precisão deste método foi de, aproximadamente, 20%. O sistema TOROS, segundo CARVALHO *et al.* (1992), apresenta desvios geralmente inferiores a 15 cm para altura, e 20 cm para o comprimento da carga, gerando um desvio

no volume aparente (em estéreo) normalmente inferior a 5% e nunca superior a 10%. BERTOLA (2002), utilizando o programa computacional “Digitora”, verificou um desvio médio de 0,424% entre os fatores de empilhamento obtidos pelas fotos e os fatores obtidos por cubagem rigorosa.

Os valores de desvios obtidos pelo aplicativo proposto foram considerados satisfatórios tendo em vista os desvios dos trabalhos análogos supracitados.

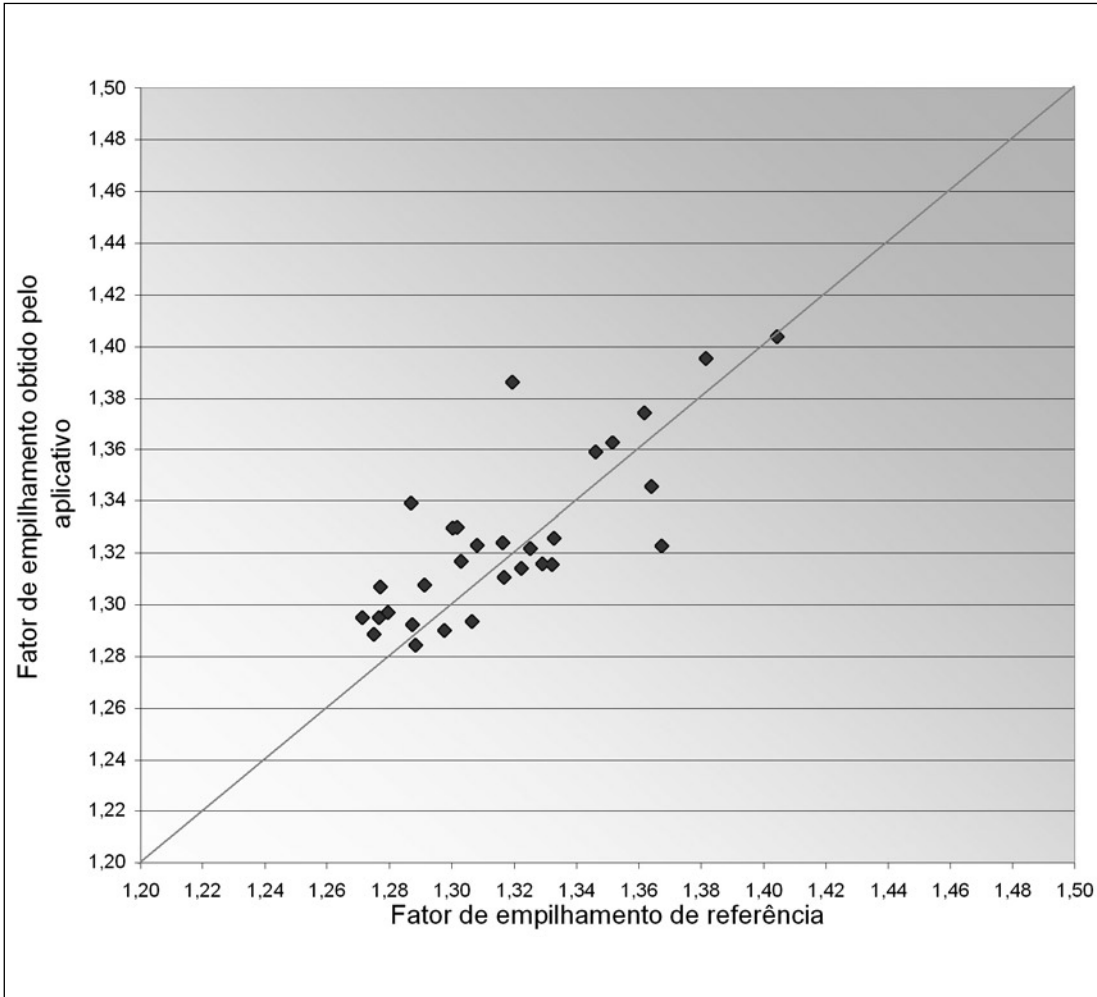


Figura 5.

Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis fator de empilhamento calculado pelo aplicativo e fator de empilhamento derivado da medição manual do volume estéreo e cubagem rigorosa.

(Dispersion diagram indicating the association between piling up variable factor calculated by the derivative piling up application and factor of the manual mensuration of the stereo volume and cubage operation)

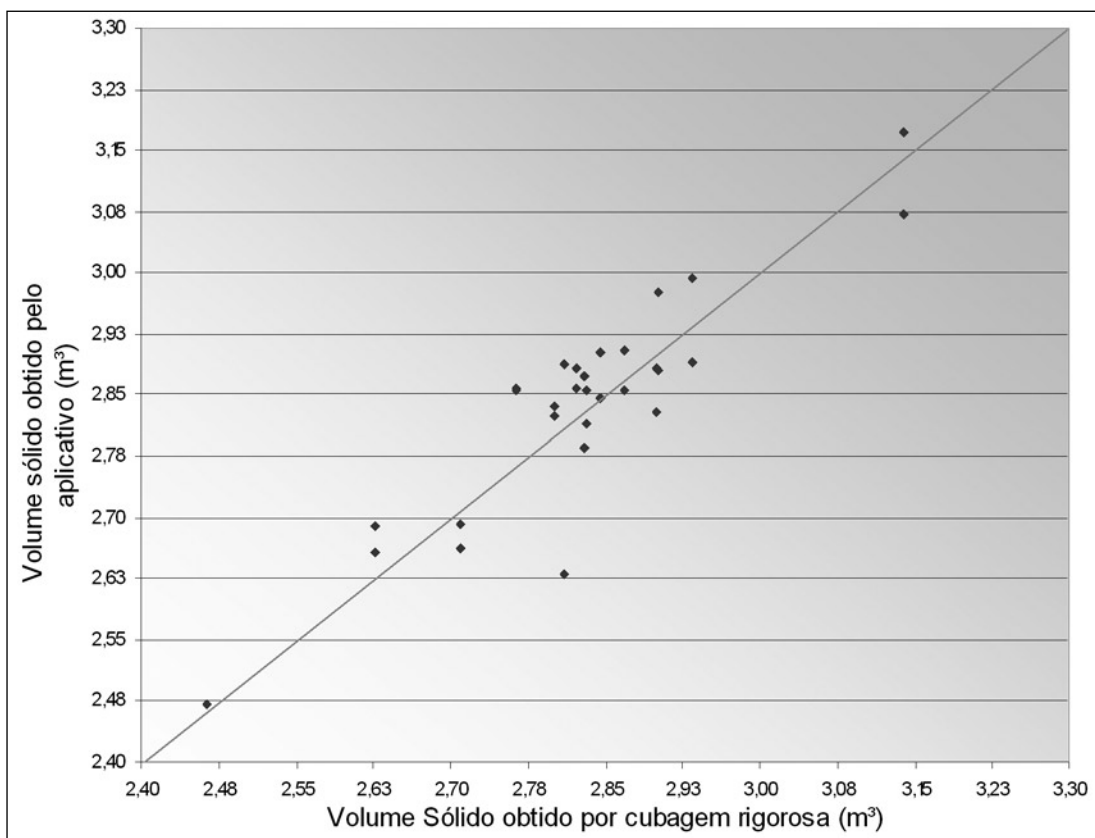


Figura 6.

Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis volume sólido calculado pelo aplicativo e volume sólido derivado de cubagem rigorosa.

(Dispersion diagram presenting the association between variable solid volume calculated by the application and solid volume derivative cubage operation)

CONCLUSÕES

Apresentando um desvio médio inferior a 1,0% entre o volume em estéreo e o volume calculado manualmente, a metodologia proposta apresentou-se como uma boa opção para o cálculo de volume aparente (estéreo). Ressalte-se, aqui, que a metodologia proposta diz respeito ao uso em ambiente não controlado, o que implica dizer que, uma vez aplicado como um sistema para ambientes controlados (cenário de fundo, iluminação), a automação poderia ser maior, diminuindo a interferência de um operador.

Identificou-se um desvio médio inferior a 2,0% na determinação do volume sólido (metros cúbicos) e inferior a 1,5% para o fator de empilhamento, com melhorias quando do uso dos dois lados da pilha.

AUTORES

Márlon Crislei da Silva é Mestre em Ciência Florestal pela UFV – Universidade Federal de Viçosa. E-mail: marloncsilva@yahoo.com.br

Vicente Paulo Soares é Professor de Sensoriamento Remoto do Departamento de Engenharia Florestal da UFV - Universidade Federal de Viçosa – Campus Universitário – Viçosa, MG – 36570-000 – E-mail: vicente@ufv.br

Francisco de Assis Carvalho Pinto é Professor de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV - Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, MG – 36570-000 – E-mail: facpinto@ufv.br

Carlos Pedro Boechat Soares é Professor de Dendrometria do Departamento de Engenharia Florestal – UFV - Universidade Federal

de Viçosa – Viçosa, MG – 36570-000 – E-mail: carlosboechat@ufv.br

Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro é Professor de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia Florestal – UFV - Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, MG – 36570-000 – E-mail: cribeiro@ufv.br

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M.C.; PEIXOTO, F.C.; ARAÚJO, A.A. Segmentação de imagens através de rede neuronal por satisfação de restrições em ambiente paralelo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 7, 1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 1994. p. 47-52.

BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. 2002. 47p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

CAMPOS, J.C.C. **Dendrometria: parte 1**. Viçosa: Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 43p. (Caderno didático, n.151).

CARVALHO, F.D.; SILVA, M.S.; CORREIA, B.B.; DAVIES, R.; FREITAS, J.C.; SILVA, J.A.; RODRIGUES, F.C.; RODRIGUES, R. Sistema de visão toros. In: ENCONTRO NACIONAL TECNICELPA: Da Floresta ao Papel, 13, 1992, Estoril. **Anais...** Estoril, 1992.

CLEVERS, J.G.P.W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimation leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, v.29, p.25-37, 1989.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992. 509p.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, 1988.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. New York: Prentice Hall, 1996. 318p.

LEITE, H.G.; OLIVEIRA, F.H.T. Statistical procedure to test identity between analytical methods. In: **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, n.33, p.1105-1118, 2002.

RIDLER, T.W.; CALVARD, S. Picture thresholding using an iterative selection method. **IEEE Trans. System Man Cybernet**, SMC-8, p.630-632, 1978.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Austin: Texas A. M. University, 1974.

SENA JÚNIOR, D.G. **Sistema de visão artificial para identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*)**. 2002. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

TUCKER, C.J. Red and photographic Infrared Linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, p.127-150, 1979.

YANG, X.; BEYENAL, H.; HARKIN, G.; LEWANDOWSKI, Z. Quantifying biofilm structure using image analysis. **Journal of Microbiological Methods**, v.39, p.109-119, 2000.