Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de *Eucalyptus* spp.Statistic tools for forest inventory auditing in *Eucalyptus* spp. standsSamuel Alves da Silva¹, Nelson Yoshihiro Nakajima¹, Ana Paula Dalla Corte¹,
Julio Eduardo Arce¹, Aurélio Lourenço Rodrigues^{1*}**RESUMO**

Com o intuito de auditar a precisão na coleta de dados que podem influenciar a estimativa do estoque de madeira em povoamentos florestais, este trabalho teve como principal objetivo avaliar o uso das ferramentas estatísticas teste-*t* de *Student* aos níveis de 95% e 99% de significância e análise gráfica dos resíduos em percentagem, na auditoria de inventários florestais. Para isso, foram sorteadas aleatoriamente 6 de um total de 120 parcelas de inventário florestal, e remediadas as variáveis circunferência a 1,30 m de altura (CAP) e altura total das árvores. Para a estimativa dos volumes foram ajustados os modelos propostos por Trorey para a altura total e Meyer para o volume individual, que apresentaram, respectivamente, valores de coeficiente de determinação (R^2 %) de 47,30% e 98,71% e erro padrão da estimativa (S_{yx} %) de 8,06% e 4,35%. Após a aferição da normalidade e igualdade das variâncias, respectivamente por meio do teste de *Kolmogorov-Smirnov* e teste *F*, os valores de CAP, altura total e volume de madeira estimados no inventário florestal foram confrontados com os das remedições, quando se pode observar que os volumes estimados e valores de CAP não diferiram estatisticamente, enquanto que os valores de altura total apresentaram diferença significativa por meio do teste-*t* em uma parcela ao nível de 95% e em outra ao nível de 99%. Por meio da análise gráfica dos resíduos foram identificadas nas medições de altura total, tendências à superestimação em duas parcelas e à subestimação em uma. As parcelas que apresentaram diferença estatística foram as mesmas que apresentaram tendências nas medições da altura total, comprovando a eficácia dos métodos.

Palavras-chave: auditoria de mensuração florestal; ferramentas da qualidade; erros não amostrais.

ABSTRACT

In order to audit the accuracy of data collection, which may influence the estimated stock of timber in forest stands, this study aimed to evaluate the use of the statistical tools *t*-test of *Student* at the significance levels of 95% and 99%, and graphical analysis of the residuals in the auditing of forest inventories. Six forest inventory plots were randomly selected from a total of 120 plots, and the variables circumference at 1.30 m high (CBH) and total height of the trees were measured. To estimate the volumes, models proposed by Trorey to the total height and Meyer for the individual volume were fitted; which presented respectively: adjusted coefficient of determination values (R^2_{aj} %) of 47.30% and 98.71% and standard error of estimate (S_{yx} %) of 8.06% and 4.35%. After checking normality and variance equality through the test of *Kolmogorov-Smirnov* and *F* test, respectively, values of CBH, total height and timber volume estimated in the forest inventory were confronted with the audited measures. It could be observed that the estimated volumes and CBH values did not differ statistically, whereas the total height values showed significant difference for the *t*-test on two plots at the level of 95%, and in one plot at the level of 99%. By graphical analysis of residuals in the total height measurements, overestimation trends in two plots were identified and underestimation in one also. The plots that showed statistical differences were the same that showed trends in the measurements of the total height, proving the effectiveness of the methods.

Keywords: audit forest mensuration; quality tools; non-sampling errors.

INTRODUÇÃO

O planejamento da produção florestal tem como principal premissa o retorno financeiro por meio da previsão da produção florestal em longo prazo (HOSOKAWA; MENDES, 1984; BEAUDOIN et al., 2008; GOMIDE et al., 2009). A quantificação do estoque de madeira é uma das atividades mais importantes do planejamento da produção das indústrias de base florestal. No censo florestal,

1. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba/ PR, Brasil. Autor Correspondente: alourencorodrigues@gmail.com

quando são medidas as variáveis biológicas de todos os indivíduos da população, obtêm-se dessa forma uma maior acurácia nesse processo, porém, é na maioria dos casos, inviável economicamente. Portanto, para a viabilização econômica da quantificação da matéria prima florestal são realizados inventários florestais utilizando-se processos de amostragem (CESARO et al., 2009; DRUSZCZ et al., 2013; UBIALI et al., 2009;).

A precisão do manejo florestal está muito relacionada à tecnologias e outros mecanismos que têm como objetivo a coleta de informações do terreno, estoque de madeira e outras variáveis, que possibilitam planos mais específicos para o controle de silvicultura, colheita, baldeio e transporte, tornando essas atividades mais precisas e reduzindo os custos operacionais em razão da maior previsibilidade dos planos operacionais e precisão nas atividades (BURGER, 2009; KLEIN et al., 2007; KOHLER et al., 2015).

A gestão da qualidade e suas variadas ferramentas podem ser aplicadas nas mais diversas atividades do setor florestal. Com a diminuição da oferta e aumento do valor da matéria prima, a aplicação das ferramentas para o controle da qualidade é fundamental para a maximização dos resultados das empresas de base florestal, tanto para a produção de maciços florestais como para a minimização dos desperdícios na indústria (JACOVINE et al., 2005; MATOS; MILAN, 2009; VATRAZ; BORGES 2014).

Por ser uma atividade que tem como objetivo quantificar e atribuir qualidade ao estoque de madeira, a acurácia dos dados do inventário florestal apresenta grande influência na precisão do manejo florestal e profunda ligação com a viabilidade econômica e financeira dos projetos florestais. Portanto, a utilização de ferramentas ligadas à gestão da qualidade, como a auditoria, pode ser aplicada às atividades de inventário florestal (PEREIRA, 2009).

A auditoria de inventário florestal, além de ser uma ferramenta de controle da qualidade e proporcionar a prevenção de eventuais erros não amostrais por meio do treinamento das equipes de campo com enfoque nas atividades identificadas como de maior necessidade, ainda pode ser uma ferramenta de segurança em negociações envolvendo madeira e florestas, possibilitando a comprovação dos resultados dos inventários florestais (POLLARD, 2005).

Assim, com enfoque no controle dos erros de medições e treinamento das equipes de campo, o objetivo do presente trabalho foi testar ferramentas de análise estatística já utilizadas no meio florestal, na avaliação de auditoria de inventário florestal, visando a identificação de possíveis diferenças estatísticas significativas entre as medições, tendenciosidades e relações com as fontes de variação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O inventário florestal utilizado como base para o presente trabalho foi executado na microrregião de Três Lagoas no estado do Mato Grosso do Sul. As áreas de estudo possuem terreno plano e pouco acidentado, em que são cultivados povoamentos florestais do gênero *Eucalyptus* spp. com espaçamento de 3 m por 2,5 m com idade de aproximadamente seis anos. O clima da região segundo Köppen é classificado como Aw, clima tropical com estação seca e chuvas inferiores a 40 mm no mês mais seco, temperatura média acima de 24° C no mês mais quente e abaixo de 20° C no mês mais frio (SANTOS, 2014).

Características do inventário florestal

O inventário florestal realizado é classificado como Pré-Corte e teve como objetivo avaliar o volume de madeira nas áreas de plantação de *Eucalyptus* spp. A intensidade amostral utilizada foi de 1 parcela de aproximadamente 720 m² para cada 3 hectares, abrangendo uma área de aproximadamente 420 hectares de plantio. O processo de amostragem utilizado foi o sistemático, no qual a primeira parcela foi sorteada aleatoriamente e as demais foram plotadas sistematicamente. As medições de campo foram realizadas por uma equipe treinada com mais de 3 anos de experiência na execução de inventários em florestas plantadas.

As parcelas instaladas possuem forma retangular com comprimento fixo de 36 m e largura variável de aproximadamente 20 m. Os dados coletados no inventário florestal e na auditoria foram: circunferência do fuste das árvores a 1,3 m de altura (CAP) de todas as árvores, utilizando fita

métrica; altura total das 10 primeiras árvores (exceto árvores mortas, bifurcadas, tortas, quebradas e inclinadas) da parcela, altura total das 7 árvores dominantes (árvores de maiores valores de CAP) conforme Assmann (1970), utilizando o hipsômetro Vertex.

Descrição do processo de auditoria

Para a realização da auditoria do inventário florestal foram sorteadas aleatoriamente 5% das 120 parcelas inventariadas abrangendo 12 talhões. Do total, 6 parcelas do inventário foram auditadas, denominadas aqui como 01, 02, 03, 04, 05 e 06. Para evitar qualquer influência sobre as medições da auditoria, as parcelas foram reinstaladas e todo o processo de remedição foi realizado seguindo rigorosamente a mesma metodologia do inventário florestal, em um intervalo de no máximo 7 dias, desde que as condições do tempo estivessem adequadas. Sobre a supervisão de um engenheiro florestal, a equipe responsável pela auditoria era composta por profissionais experientes que não estavam envolvidos no inventário e para a medição dos valores de CAP, contavam com uma baliza de 1,30 para a determinação da altura do peito.

Tratamento dos dados

Neste trabalho foram analisados somente os dados quantitativos do inventário florestal, ou seja, as variáveis circunferência medida a 1,30 metros de altura do solo (CAP) e altura total das árvores. As medições provenientes das auditorias foram consideradas como parâmetros em todas as comparações realizadas entre os processos. Com exceção da análise gráfica dos resíduos, os valores "0" ou nulos resultantes de variações totais foram contabilizados no processo estatístico. Esses valores são correspondentes às medições realizadas em apenas um dos processos, resultado da dependência entre a medição dessa variável com a avaliação qualitativa das árvores.

Com o intuito de constatar possíveis diferenças estatísticas significativas entre as medições e estimativas provenientes dos dois processos, os valores de CAP, altura total e volume de madeira com casca, provenientes das medições do inventário florestal e da auditoria foram analisados estatisticamente por meio do teste-*t* de *Student* para duas amostras independentes, aos níveis de significância de 95% e 99% de probabilidade. Uma vez que a hipótese nula é que não existe diferença estatística entre as medições e a hipótese alternativa é que existe diferença, o teste utilizado foi o bicaudal. Para a verificação dos pré-requisitos de normalidade dos dados e igualdade de variância, foram respectivamente utilizados os *Testes de Kolmogorov-Smirnov* (Equação 1) e *Teste F* (Equação 2). (BANZATTO; KRONKA, 2006).

$$D_{cálcl} = \sup_x |F(x) - F_n(x)| \quad (1)$$

$$F_{cálcl} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2)$$

Em que:

$F(x)$ = Função de distribuição acumulada assumida para os dados;

$F_n(x)$ = Função de distribuição acumulada empírica dos dados;

$\sup$ = Função supremo;

$F_{cálcl}$ = Valor do teste *F* calculado;

S_1^2 = Variância da amostra da auditoria;

S_2^2 = Variância da amostra do inventário florestal.

Feito isso, de acordo com Draper e Smith (1980), para a identificação de possíveis tendências nas medições dos valores de CAP e altura total, foram construídos gráficos de distribuição de resíduos em percentagem, presumindo uma tolerância de variação de $\pm 5\%$ na distribuição dos resíduos (Equação 3).

$$Resíduo(\%) = \frac{Y_a - Y_i}{Y_a} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

Y_a = Variável proveniente da auditoria.

Y_i = Variável proveniente do inventário florestal.

Ajuste de modelos hipsométricos e de volume

A fim de demonstrar a influência dos erros não amostrais encontrados no volume de madeira das parcelas, foram ajustados os modelos apresentados na Tabela 1, respectivamente, para a estimativa da altura total e volume de árvores individuais. O modelo hipsométrico foi ajustado a partir de 2.109 dados de altura total coletados no inventário florestal, o ajuste do modelo de volume foi efetuado a partir da cubagem de 63 árvores. Como critérios de avaliação de ambos, foram utilizadas as estatísticas de coeficiente de determinação ($R^2\%$), erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e análise gráfica dos resíduos em forma relativa (percentagem).

Tabela 1: Modelos hipsométrico e de volume ajustado.

Table 1: Fitted hypsometric and volume equations.

Modelos ajustados		Autor /Nomenclatura
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2$	Torey
2	$v = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 d h + \beta_4 d^2 h + \beta_5 h$	Meyer

Em que: v = volume total da árvore (m^3) h = altura comercial da árvore (m), d = diâmetro medido a 1,30m de altura (cm) e β_i = parâmetros a serem estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2, mostra o resultado dos testes de Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade dos dados e teste F para vera verificação da igualdade das variâncias.

Tabela 2: Resultado da análise dos requisitos para avaliação dos dados.

Table 2: Result of the analysis of the data evaluation requirements.

Kolmogorov-Smirnov			Teste F	
Processo	D cálc.	Valor - P	F cálc.	Valor - P
		Valores de CAP (cm)		
Auditoria	0,07629	0,12680 ns	0,84276	0,18956 ns
Inventário	0,08468	0,06777 ns		
		Valores de Altura (m)		
Auditoria	0,11222	0,24753 ns	1,22079	0,36824 ns
Inventário	0,11257	0,24430 ns		
		Volumes (m^3)		
Auditoria	0,05976	0,36918 ns	0,96041	0,75662 ns
Inventário	0,06319	0,30426 ns		

Em que: D cálc. = Valor estatístico do teste de Kolmogorov-Smirnov calculado; F cálc. = Valor estatístico do teste de Kolmogorov-Smirnov calculado; P = Probabilidade de significância; ns = não significativo; * = resultado significativo a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% de probabilidade.

Observa-se que todos os valores - P dos resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov são maiores ou iguais a 0,05, assim, pode-se afirmar que são provenientes de uma distribuição normal com 95% de confiança. O mesmo ocorre com os valores - P dos resultados do teste F, sendo assim, também pode-se afirmar que apresentam variâncias iguais. Provas da normalidade da distribuição dos dados das variáveis avaliadas também podem ser observadas na Figura 1, por meio dos gráficos Quantil-Quantil (Q-Q plot).

Com as amostras das variáveis comprovadamente provenientes de distribuição normal e variâncias estatisticamente iguais, foi dada continuidade na avaliação auditoria. O resultado da análise estatística das medições dos valores de CAP é apresentado na Tabela 3.

É possível observar que não houve diferenças significativas para o teste-t de Student entre as medições dessa variável. Na parcela 02 não foi inclusa uma árvore no inventário florestal.

O resultado da análise estatística das medições dos valores de altura total, apresentado na Tabela 4, mostra que houve diferença significativa para o teste-t de Student até o nível de 99% nas medições da parcela 06 e ao nível de 95% na parcela 03, não havendo diferença significativa nas demais parcelas e no total.

Figura 1: Gráficos quantil-quantil para verificação da normalidade das variáveis avaliadas.

Figure 1: Quantile-quantile graphs to verify the normality of the evaluated variables.

Tabela 3: Resultado da análise estatística dos valores de CAP.

Table 3: Results of statistical analysis of CBH values.

Parcela	Processo	Contagem	CAP Médio (cm)	gl	<i>t calc.</i>	Valor - <i>P</i>
01	Auditoria	44	60,7932	86	0,05905	0,9531 ns
	Inventário	44	60,6409			
02	Auditoria	32	63,8938	61	0,08678	0,9311 ns
	Inventário	31	63,6806			
03	Auditoria	39	61,4333	76	0,05952	0,6119 ns
	Inventário	39	60,3641			
04	Auditoria	41	59,3122	80	-0,25217	0,8016 ns
	Inventário	41	59,6390			
05	Auditoria	38	60,0395	74	-0,44677	0,6563 ns
	Inventário	38	60,5921			
06	Auditoria	43	64,0930	84	-0,04991	0,9603 ns
	Inventário	43	64,1605			
Total	Auditoria	237	61,5388	471	0,10788	0,9141 ns
	Inventário	236	61,4538			

Em que: gl = graus de liberdade; *t calc.* = valor de *t* calculado; *P* = Probabilidade de significância; ns = não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% de probabilidade.

As distribuições gráficas dos resíduos entre as medições dos valores de CAP, apresentados na Figura 2, mostram que as parcelas 01 e 04 apresentam as melhores distribuições, com a maior parte dos valores residuais muito próximos de zero. As parcelas 05 e 06 apresentaram a maior parte dos

Tabela 4: Análise estatística dos valores de altura total.

Table 4: Statistical analysis of the total height values.

Parcela	Processo	Contagem	Altura Total Média (m)	gl	t calc.	Valor - P
01	Auditoria	14	26,9500	28	-0,2849	0,7778 ns
	Inventário	16	27,3313			
02	Auditoria	16	25,8250	30	0,7364	0,4673 ns
	Inventário	16	25,4063			
03	Auditoria	13	27,6769	25	2,1515	0,0413 *
	Inventário	14	26,7785			
04	Auditoria	14	26,4429	26	-1,9658	0,0605 ns
	Inventário	14	27,5357			
05	Auditoria	17	28,1412	32	0,0771	0,9390 ns
	Inventário	17	28,1176			
06	Auditoria	13	29,4384	24	-3,3206	0,0029 **
	Inventário	13	30,9077			
Total	Auditoria	87	27,3747	175	-0,6439	0,5205 ns
	Inventário	90	27,6000			

Em que: gl = graus de liberdade; t calc. = valor de t calculado; P = Probabilidade de significância; ns= não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% de probabilidade.

Figura 2: Distribuição gráfica dos resíduos dos valores de CAP em percentagem, em função do CAP das parcelas 01, 02, 03, 04, 05 e 06.

Figure 2: Graphic distribution of residuals of CBH values in percent, based on the CBH of the plots 01, 02, 03, 04, 05 and 06.

valores residuais dentro da amplitude de variação de $\pm 5\%$, com uma árvore em cada uma delas fora desse intervalo, com variações próximas a -20% e 15% respectivamente. Com exceção de uma árvore que apresentou variação próxima a 30% , a parcela 03 apresentou a grande maioria das variações entre $\pm 5\%$. A parcela 02, além de não incluir uma árvore no inventário florestal, apresentou 5 árvores com valores residuais fora da amplitude de variação de $\pm 5\%$, cujas dispersões chegaram a 35% e -50% e, por ultrapassarem o limite gráfico, não foram apresentadas. Quanto à tendenciosidades, se observa que quando presentes, foram ínfimas, inferiores a ordem de $2,5\%$.

O resultado do teste-*t* de *Student* das parcelas se mostrou compatível com o apresentado pelos gráficos de distribuição dos resíduos em percentagem, com exceção da parcela 02, a qual apresentou 5 árvores com variações acima do aceitável, o que representa cerca de 16% do número total de indivíduos da parcela e o erro de não inclusão de uma árvore no processo de inventário, correspondente à omissão de cerca de 3% do número de indivíduos.

No presente trabalho, a ocorrência desses erros tem como agravante os métodos de mensuração adotados para que isso fosse evitado, como a numeração das árvores e linhas de plantio. Assim, uma possível causa da alta variação entre as medições e a não inclusão de uma árvore na parcela 02, pode ser o não cumprimento da ordem de caminhamento na parcela (sequência de medições, respeitando a ordem crescente do número de árvores e linhas), por parte da equipe de campo.

De acordo com Sanquetta et al., (2009), a inclusão ou exclusão de árvores da unidade amostral de forma errônea caracteriza-se como grave erro não amostral, por ocasionar tendenciosidade significativa nas estimativas do inventário. Segundo Kangas e Maltamo (2006), parcelas retangulares, como as utilizadas no presente estudo, apresentam grande vulnerabilidade na alocação, pois diferenças angulares podem alterar a área da parcela, facilitando a inclusão ou exclusão de árvores erroneamente. Péllico Netto e Brena (1997) relatam que as parcelas circulares apresentam o menor perímetro dentre todas as formas possíveis, o que influencia diretamente na quantidade das árvores marginais, as quais podem gerar dúvida quanto à inclusão na parcela. Dessa forma, uma possível maneira de mitigar a ocorrência desse tipo de erro no inventário é a adoção de parcelas circulares, o que segundo Kershaw Junior et al., (2016), por necessitar de apenas uma medida (raio), ainda facilita e agiliza o processo alocação no campo.

As distribuições gráficas dos resíduos entre as medições dos valores de altura total, apresentados na Figura 2, mostram que a parcela 01 apresentou a maior parte dos valores residuais no intervalo de $\pm 5\%$ e duas árvores cujas variações foram próximas a -10% e -20% , sendo assim, a melhor distribuição entre as medições dos valores de altura total. A parcela 02 apresentou a maior parte dos valores residuais no intervalo de $\pm 5\%$, com uma árvore variando aproximadamente 10% . Com variações entre 0% e 6% a parcela 03 apresentou clara tendência à subestimação dos valores. Já as parcelas 04 e 06 apresentaram variações respectivamente entre 5% e -15% e 6% e -14% e a grande quantidade de resíduos negativos revela tendência à superestimação nas medições do inventário florestal. A parcela 05 apresentou valores residuais entre 7% e -5% , não demonstrando tendências nas medições.

Como consequência do método adotado, no qual a mensuração da altura total dependeu da avaliação qualitativa das árvores, dez árvores tiveram essa variável medida em apenas um dos processos e não apresentaram resíduos gráficos. A parcela 01 apresentou duas árvores com altura total medidas apenas no inventário florestal e essas foram classificadas na auditoria como torta e quebrada; a parcela 03 também apresentou duas árvores, classificadas na auditoria como torta e bifurcada; as parcelas 02 e 06 apresentaram uma árvore cada, classificadas na auditoria como bifurcadas e a parcela 05 uma árvore não classificada como dominante na auditoria. As parcelas 03, 05 e 06 apresentaram uma árvore cada com a altura total medida apenas na auditoria, essas foram consequências dos equívocos das avaliações qualitativas do inventário florestal.

Embora se tenha incluído as árvores que não apresentaram resíduos gráficos, o teste-*t* de *Student* mostrou conformidade com o resultado dos gráficos de distribuição dos resíduos. Nota-se que as parcelas, 03 e 06, nas quais se detectou diferenças estatísticas, foram as que apresentaram tendenciosidades perceptíveis nos gráficos de distribuição dos resíduos em percentagem, podendo ser detectado por meio do Valor - *P* na parcela 04, que embora não seja significativo, ficou bem próximo do limite.

Segundo Mendonça et al. (2011) e Ribeiro et al. (2010), em comparação com a medição dos valores de CAP, a medição das alturas das árvores é mais onerosa e demanda maior experiência da equipe de medição, por isso está sujeita a mais fontes de erros. Os resultados do presente estudo apresentam conformidade com a afirmação dos autores citados, ao comparar o desempenho das medições das variáveis. Observou-se maior número de parcelas que apresentaram diferença estatística, menores valores - *P* e maior amplitude de variação entre os resíduos gráficos nas medições dos valores de altura total.

De acordo com a terminologia descrita por Kershaw Junior et al., (2016), a maior amplitude de variação indica menor precisão entres as medições de alturas, o que pode ser justificado pela

característica indireta das medições realizadas com hipsômetros, ou seja, trata-se de estimativas, por isso são dependentes da precisão e erro específicos dos aparelhos (JESUS et al., 2012).

Ao avaliarem o desempenho dos hipsômetros Vertex, Trupulse e Clinômetro digital na medição da altura total de 30 indivíduos de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don., Dalla Corte et al. (2016), utilizaram a análise de variância e o gráfico de distribuição dos resíduos para comparar as medições dos hipsômetros com as obtidas com trena das mesmas árvores depois de abatidas (tratamento testemunha). A análise de variância não apresentou diferença estatística. Para o hipsômetro Vertex, foram observadas variações entre -15% e 10% no gráfico, a distribuição dos resíduos se assemelhou às das parcelas 01, 02 e 05 do presente estudo, sem tendenciosidade aparente.

Jesus et al., (2012) avaliaram o desempenho dos hipsômetros Haga, Suunto e Vertex na medição da altura total de 33 árvores de um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Para a avaliação, os valores obtidos pelos hipsômetros também foram comparados com os obtidos com trena das mesmas árvores depois de abatidas e utilizada a análise de variância e o gráfico de distribuição dos resíduos. Sem apresentar diferença significativa na análise de variância, semelhante a distribuição dos resíduos das parcelas 04 e 06, as medições realizadas com o hipsômetro Vertex apresentaram variações entre -15% e 5%, com visível tendência a superestimativa.

Observa-se que, semelhante às medições obtidas nas parcelas do presente estudo, o mesmo aparelho apresentou resultados diferentes nos dois trabalhos apresentados, um sem tendenciosidade e outro com tendência a superestimativa. Considerando a tendenciosidade observada nas distribuições dos resíduos das parcelas 03, 04 e 06, a falta de calibração e possíveis leituras equivocadas nas escalas são fontes de erros descartadas, considerando que a distribuição dos resíduos ocasionada por essas fontes de erros seria aleatória.

De acordo com o estudo de Silva et al., (2012), a distância entre o medidor e a árvore exerce grande influência sobre o desempenho das medições de altura e deve ser proporcional à altura da árvore a ser medida. Embora o aparelho Vertex não necessite do conhecimento prévio da distância entre o medidor e a árvore, ao contrário de Jesus et al., (2012), Dalla Corte et al., (2016) adotaram a mesma distância para a medição de todas as árvores, o que provavelmente propiciou melhor desempenho do aparelho. Dessa forma, nas parcelas com tendenciosidades, a proporcionalidade entre distância e altura provavelmente não foram consideradas, por isso, para a mitigação da ocorrência dessas variações, é recomendada a padronização da distância.

Os valores estatísticos de precisão e coeficientes resumidos resultantes dos ajustes de modelos hipsométricos e de volume (Tabela 5) mostram que o modelo hipsométrico de Trorey foi satisfatório, considerando que, segundo Scolforo (1998), é comum que o valor do coeficiente de determinação não ultrapasse 80%, uma vez que a correlação entre altura e diâmetro não é tão forte quanto a de altura e volume. O erro padrão da estimativa em percentagem está abaixo de 10%, que quando comparado aos valores obtidos por Mello et al. (2011) ao testarem 6 modelos hipsométricos para povoamentos de *Eucalyptus* sp. no estado de Sergipe, obtiveram valores de erro padrão da estimativa variando entre 27,5% e 28,73%.

O resultado do ajuste da equação de Meyer mostrou alta acurácia, com valor de coeficiente de determinação superior a 98% e erro padrão da estimativa em percentagem inferior a 5%; esse resultado foi superior ao encontrado por Thiersch et al. (2006) para estimativa de volume comercial de clones

Tabela 5: Coeficientes e principais estatísticas dos modelos hipsométrico e de volume.

Table 5: Coefficients and key statistics for hypsometric and volume models.

Modelo hipsométrico		Coeficientes		R ² %	S _{yx} %
1	Trorey	β0	1,784275	47,2957	8,0648
		β1	1,785758		
		β2	-0,026154		
Modelo de volume		Coeficientes		R ² %	S _{yx} %
2	Meyer	β0	1,248846	98,8128	4,3486
		β1	-0,144686		
		β2	0,003894		
		β3	0,006783		
		β4	-0,000132		
		β5	-0,057267		

Em que: R² = coeficiente de determinação; S_{yx}% = erro padrão da estimativa; βi = coeficientes.

de *Eucalyptus sp.* pelo mesmo modelo, cujos coeficientes de determinação dos ajustes variaram entre 98,6% e 97,6%, para dois tipos de clones, e os erros da estimativa foram de 6,02% e 7,62%.

Os gráficos de distribuição dos resíduos em porcentagem provenientes dos modelos de Trorey e Meyer ajustados (Figura 3) não apresentaram tendenciosidade em suas estimativas. Os resíduos em porcentagem variaram entre aproximadamente 40% e -40%, com maior concentração próxima a 20% e -20% de variação para o modelo hipsométrico de Trorey. O modelo de volume de Meyer apresentou variações entre 10% e -16%, com maior concentração próxima a 5% e -5%.

Figura 3: Distribuição gráfica dos resíduos dos valores de altura em porcentagem, em função do DAP para o modelo de Trorey os e distribuição gráfica dos resíduos dos valores de volume, em porcentagem, em função do DAP para o modelo Meyer.

Figure 3: Graphic distribution of residuals of height values in percentage, based on DAP for the models of Trorey; and Graphic distribution of residuals of volume values, in percentage, based on the DBH for Meyer's model.

A soma do volume com casca estimado para as parcelas do processo de auditoria foi de 138,096 m³, o equivalente uma média de 23,016 m³ por parcela e 319,667 m³.ha⁻¹, para as parcelas do inventário, a soma do volume foi de 137,838 m³, o equivalente a uma média de 22,973 m³ por parcela e 319,069 m³.ha⁻¹. Dessa forma, ao comparar a estimativa de volume com casca, se observa a diferença de 0,258 m³ a mais de madeira no processo de auditoria, o equivalente a aproximadamente 0,597 m³.ha⁻¹. Embora exista a não inclusão de uma árvore na parcela 02 no processo de inventário florestal, o resultado da análise estatística (Tabela 6) mostra que não houve diferença significativa para o teste-*t* de *Student*,

Nota-se que, devido a não inclusão de uma árvore na parcela 02, a diferença estatística identificada por meio do teste-*t* de *Student*, e as tendenciosidades encontradas nos gráficos de distribuição dos resíduos em porcentagem para as alturas das parcelas 03, 04 e 06, não ocasionaram diferença estatística entre as estimativas de volume. O motivo do erro de não inclusão de uma árvore em parcela não acarretar em diferença estatística significativa pode ser o pequeno volume individual das árvores do povoamento, principalmente consequência da idade e espaçamento. A justificativa para as diferenças estatísticas e tendenciosidades observadas nas medições de altura total pode ser a menor contribuição dessa variável na estimativa do volume individual, em comparação com a variável diâmetro (Figura 4).

Com a hipótese de que existe relação entre erros de medição e declividade do terreno, Pereira (2009) auditou um inventário florestal realizado em plantios de *Eucalyptus spp.* provenientes de 14 áreas planas e 7 áreas declivosas. Porém, ao invés de usar o teste *t* de *Student* para averiguar a possibilidade de diferença estatística entre as medições e o gráfico de distribuição dos resíduos para observar possíveis tendenciosidades nas medições, o autor avaliou a auditoria com base no erro médio em módulo entre as medições, cartas de controle e folhas de verificação de qualidade.

Assim como no presente estudo, o referido autor observou que os valores médios de CAP apresentaram forte semelhança entre os processos, o que não ocorreu com os valores de altura, ao avaliar os volumes por meio do erro em porcentagem. Observou ainda que 11 das áreas planas, foram subestimadas no inventário florestal e 3 apresentaram superestimação. Quando avaliou as áreas declivosas, observou que a subestimação ocorreu em 5 parcelas e a superestimação em 2 parcelas. Dessa forma, concluiu que as medições realizadas no inventário apresentavam tendência a subestimativa do volume e que a incidência de erros não apresentou relação com os erros de medição.

Diferente da avaliação com as ferramentas apresentadas no presente estudo, a realizada por Pereira (2009) não permite identificar diferenças estatísticas significativas e tendências, o que também dificulta a identificação das possíveis fontes de erros e de suas respectivas mitigações.

Tabela 6: Resultados de volumes com casca estimado.

Table 6: Results estimated volume with bark.

Parcela	Processo	Contagem	Volume Médio (m³)	gl	t calc.	Valor - P
01	Auditoria	44	0,5748	86	-0,3698	0,9706 ns
	Inventário	44	0,5768			
02	Auditoria	32	0,6105	61	0,2044	0,8387 ns
	Inventário	31	0,6010			
03	Auditoria	39	0,5848	75	0,7483	0,4566 ns
	Inventário	39	0,5567			
04	Auditoria	41	0,5265	80	-0,5908	0,5563 ns
	Inventário	41	0,5422			
05	Auditoria	38	0,5576	74	-0,0388	0,6993 ns
	Inventário	38	0,5679			
06	Auditoria	43	0,6438	84	-0,4451	0,6573 ns
	Inventário	43	0,6583			
Total	Auditoria	237	0,5827	471	-0,0867	0,9310 ns
	Inventário	236	0,5801			

Em que: gl = graus de liberdade; t calc. = valor de t calculado; P = Probabilidade de significância; ns = não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% de probabilidade.

Figura 4: Distribuição gráfica dos resíduos dos valores de altura total em percentagem, em função da altura das parcelas 01, 02, 03, 04, 05 e 06.

Figure 4: Graphic distribution of residuals of total height values in percentage, based on the height of the plots 01, 02, 03, 04, 05 and 06.

CONCLUSÕES

As ferramentas utilizadas apresentaram bom desempenho para a avaliação da auditoria do inventário florestal, a aplicação do teste *t* de *Student* possibilitou a identificação de diferenças estatísticas, enquanto o gráfico de distribuição dos resíduos em percentagem, as tendenciosidades. A avaliação também possibilitou relacionar o comportamento das variações com as possíveis fontes de variação, o que facilita o emprego de ações corretivas.

Não houve diferença estatística significativa entre os volumes estimados. Em comparação com os valores de CAP, a variável altura total está mais susceptível a incidência de erros de medição. As parcelas identificadas com diferença estatística significativa foram as que apresentaram tendenciosidades visíveis entre as medições.

REFERÊNCIAS

- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Pergamon Press, 1970. 506 p.
- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237p.
- BEAUDOIN, D.; FRAYRET, J. M.; LEBEL, L. Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical-operational planning integration. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, p. 2198-2211, 2008.
- BURGER, J. A. Management effects on growth, production and sustainability of managed forest ecosystems: Past trends and future directions. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 10, p. 2335-2346, 2009.
- CESARO, A.; ENGEL, O. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus sp*. **Ciência Florestal**, v. 4, n. 1, p. 97-108, 2009.
- DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; OLIVEIRA, K. A.; BEHLING, A.; COUTINHO, V. M. Desempenho de diferentes equipamentos para mensuração de diâmetro a 1,30 m, altura individual total, e volume do fuste em *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 432-441, 2016.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 709 p. 1980.
- DRUSZCZ, J. P.; NAKAJIMA, N. Y.; NETTO, S. P.; MACHADO, S. A.; ROSOT, N. C.; BAMBERG, R. Eficiência de duas variações estruturais do método de amostragem de área fixa em plantações de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 621-632, 2013.
- GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. D. Uso do algoritmo genético no planejamento florestal considerando seus operadores de seleção. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 460- 467, out./dez. 2009.
- HOSOKAWA, R. T.; MENDES, J. B. Planejamento florestal: técnicas para a manutenção da contribuição do setor florestal à economia nacional. **Floresta**, v. 15, n. 1/2, p. 4-7, 1984.
- JACOVINE, L. A. G.; MACHADO, C. C.; SOUSA, A. P.; GARCIA, H. Avaliação da qualidade operacional em cinco subsistemas de colheita florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 391-400, 2005.
- JESUS, C. M.; MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A.; ENCINAS, J. I. Avaliação de diferentes hipsômetros para medição da altura total em um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 291-299, 2012.
- KANGAS, A.; MALTAMO, M. (Ed.). **Forest inventory: methodology and applications**. Springer Science & Business Media, 2006. 363 p.
- KERSHAW JUNIOR, J. A.; DUCEY, M. J.; BEERS, T. W.; HUSCH, B. **Forest mensuration**. Oxford: John Wiley & Sons, 2016. 633 p.
- KOHLER, S. V.; FIGUEIREDO FILHO, A. ARCE, J. E.; MACHADO, S. A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do paraná e Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 545-554, 2015.

- KLEIN, W. L.; DE SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H. P. Altura do ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae*) nos manejos convencional e de precisão, analisada pela geoestatística. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 4, p. 299-309, 2007.
- MATOS, R. B.; MILAN, M. Avaliação sistêmica do modo de análise de falhas e efeitos (FMEA) para o desenvolvimento de indicadores de desempenho de empresas de pequeno porte. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 977-985, 2009.
- MELLO, A. A. D.; AZEVEDO, T. L.; FERREIRA, R. A.; SANQUETTA, C. R.; NAKAJIMA, N. Y. Equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de *Eucalyptus* sp. localizado na FLONA do Ibura, Sergipe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 105-112, 2011.
- MENDONÇA, A. D.; CALEGARIO, N.; SILVA, G.; BORGES, L.; CARVALHO, S. Modelos hipsométricos e de crescimento em altura das árvores dominantes e codominantes para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 151-160, 2011.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. **Inventário florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997, 316 p.
- PEREIRA, R. M. **Gestão da qualidade aplicada ao inventário de florestas plantadas**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- POLLARD, J. **Forest Inventory and Analysis: Quality Assurance**. Fort Collins: USDA, 2005. (IA Fact Sheet Series).
- RIBEIRO, A.; FILHO, A. C. F.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 22-31, 2010.
- SANTOS, A. A. Ocorrência de espécies arbóreas em áreas urbanas e suburbanas de Três Lagoas, MS. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 3926-3932, 2014.
- SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; DALLA CORTÊ, A. P.; FERNANDES, L. D. A.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: Multi-Graphic, v. 2, 2009. 315p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. v. 1. 443 p.
- SILVA, G. F.; MENDES, O. O.; SOUZA, C. A. M.; SOARES, C. P. B.; LEMOS, R. Influência de diferentes fontes de erro sobre as medições de alturas de árvores. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 397-405, 2012.
- THIERSCH, C. R.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R.; DEHON, G. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 167-181, 2006.
- UBIALI, J. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; ARCE, J. E. Comparação de métodos e processos de amostragem para estudos fitossociológicos em uma floresta ecotonal na região norte matogrossense. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 511 – 523, 2009.
- VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. Procedimentos de controle do volume de madeira estimado e colhido em um plantio de *Pinus* spp. no Paraná. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 445-453, 2014.

Recebido em: 19/08/2017

Aceito em: 20/06/2018