

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais

MODELOS PARA ESTIMAR O VOLUME DE
MADEIRA DA RESERVA EXTRATIVISTA AUATÍ-PARANÁ,
REGIÃO DO ALTO SOLIMÕES, FONTE BOA (AM)

JUVENAL MARTINS GOMES

MANAUS/AMAZONAS
DEZEMBRO/2008

JUVENAL MARTINS GOMES

**MODELOS PARA ESTIMAR O VOLUME DE
MADEIRA DA RESERVA EXTRATIVISTA AUATÍ-PARANÁ,
REGIÃO DO ALTO SOLIMÕES, FONTE BOA (AM)**

ORIENTADOR: Dr. NIRO HIGUCHI

CO-ORIENTADOR: Dr. JOAQUIM DOS SANTOS

Dissertação apresentada ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.

**MANAUS/AMAZONAS
DEZEMBRO/2008**

G633

Gomes, Juvenal Martins

Modelos para estimar o volume de madeira da Reserva Extrativista Auatí-Paraná, na região do Alto Solimões, Fonte Boa (AM) / Juvenal Martins
Gomes.--- Manaus : [s.n.], 2009.

xi, 69 f. : il. color.

Dissertação (mestrado)-- INPA/UFAM, Manaus, 2009

Orientador : Niro Higuchi

Co-orientador : Joaquim dos Santos

Área de concentração : Manejo Florestal

1. Madeira caída. 2. Volumetria. 3. Alometria. 4. Manejo florestal. 5. Florestas tropicais – Amazônia. I. Título.

CDD 19. ed. 634.98

Sinopse:

Estudou-se o uso de modelos volumétricos para estimativa do volume de madeira com casca na Reserva Extrativista Auatí-Paraná. Árvores recém-caídas em bom estado de conservação foram usadas como conjunto de dados geradores das equações de volume. Aplicaram-se os procedimentos da cubagem rigorosa para obtenção das variáveis, diâmetro e altura ao longo do fuste, e de análises de regressão para gerar os modelos.

Palavras-chave: Alometria, madeira caída, manejo florestal.

OFEREÇO

À memória dos irmãos: Elizabete, Antônio Marcos, Marcos Antônio, Pedro e José Antônio.

A minha mãe, Etelvina Martins Gomes e ao meu pai, Antônio Tarcisio Gomes, pelo empenho na minha formação e amor ao longo de todos esses anos de minha ausência. Aos irmãos: Eliane, Ernane, Natalino, Sebastião e Vicente.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo acompanhamento de todos os passos de minha vida, guiando e confortando em momentos difíceis.

Neste momento, faz-me necessário agradecer diversas pessoas e entidades que direta ou indiretamente ajudaram na concretização deste trabalho:

Aos meus pais e irmãos pelo imenso incentivo prestado nos momentos cruciais.

À amiga, namorada e companheira Elisabeth, uma pessoa maravilhosa. Uma âncora do dia-a-dia!

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, em especial ao curso de pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais, pela oportunidade desta pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa.

Ao Dr. Niro Higuchi e ao Dr. Joaquim dos Santos pela orientação, apoio e amizade.

Ao amigo Adriano Nogueira Lima pela amizade e longas discussões sobre este trabalho, ajuda valiosa.

As comunidades da Reserva Extrativista Auatí-Paraná, na época da campanha de campo, pelo apoio que recebemos durante este trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal – LMF/INPA, pela convivência e ajuda na execução deste trabalho.

Aos integrantes da equipe de campo, no período de coleta dos dados, muito obrigado pela força e disposição em sempre ajudar. Valeu família ZF2!

Aos amigos e colegas de república: Shanna, Henrique, Murilo, Geângelo, Marcos Bento, Ricardo e Mônica. Muitas lições e bons momentos vivenciados juntos!

Aos amigos do mestrado CFT, e aos demais amigos do INPA e da UFAM. Em especial aos amigos da minha turma de mestrado, uma galera nota dez. Muitos bons momentos compartilhados e boas discussões enriquecedoras sobre a Amazônia e a vida. Valeu amigos!

Muito Obrigado!

RESUMO

O Manejo Florestal Sustentável depende de estimativas quali-quantitativas precisas e consistentes do volume de madeira para regiões, sítios e espécies florestais. Por isso as equações de volume são ferramentas imprescindíveis na execução do Manejo Florestal, para ordenar e avaliar o estoque em potencial e a produtividade do sítio. Este estudo foi desenvolvido na área da Reserva Extrativista Auatí-Paraná localizada no município de Fonte Boa, região do Alto Solimões, AM. Foram testados 18 modelos volumétricos (seis equações de simples entrada e doze de dupla entrada) com base na cubagem rigorosa de 206 árvores recém-caídas. Com relação aos modelos gerais, entre as equações de dupla entrada, o modelo de *Schumacher-Hall* original obteve os melhores ajustes, com $R^2_{aj}=0,95$, erro de 5,18% e boa distribuição dos erros, sendo superior aos modelos de única entrada. Entre os modelos de simples entrada, o modelo logarítmico de *Husch* foi o que melhor se ajustou aos dados, no conjunto dos indicadores, com $R^2_{aj}=0,95$, $S_{yx}=11,5\%$ e boa distribuição dos resíduos. No ajuste de equações para as árvores na classe diamétrica $10 \leq DAP < 50$ cm, obtiveram-se equações mais precisas que as equações gerais. O modelo de dupla entrada logarítmico, $\ln V = a + b \ln DAP^2 HC$, com a variável combinada de Spurr foi o melhor ajustado ($R^2_{aj} = 0,97$ e $S_{yx} = 4,18\%$). Entre as equações de simples entrada nesta classe de diâmetro o modelo $\ln V = a + b \ln DAP$ apresentou bons indicadores ($R^2_{aj} = 0,92$ e $S_{yx} = 6,46\%$). Já o ajuste de equações para a classe de diâmetro $DAP \geq 50$ cm não resultou em equações melhor ajustadas que os modelos gerais. Ainda ajustaram-se equações para três espécies: tauari (*Cariniana sp.*), castanha-sucupira (*Curupira tefeensis*) e anoerá (*Beilschmiedia brasiliensis*), tendo um bom ajuste a equação não linear exponencial para as duas primeiras espécies. Recomendam-se a equação de simples entrada de *Husch* para uso local no manejo da floresta na Resex e a equação de *Schumacher-Hall* para uso regional em outros sítios de florestas similares. O uso de árvores recém-caídas como conjunto de dados geradores dos modelos é viável e consistente. É de fácil obtenção e operacionalização a cubagem de árvores caídas que estejam em boas condições, em florestas tropicais.

ABSTRACT

Sustainable Forest Management relies on precise and consistent qualitative and quantitative wood volume estimation for regions, sites and forest species. Therefore volume equations are indispensable for the forest manager to plan and evaluate the stand's potential stock and yield. This study was carried out in the area of the Reserva Extrativista Auatí-Paraná, located on the Fonte Boa municipality, Upper Solimões region, Amazonas State. 18 volumetric models (six single- and twelve double-entry equations) were tested based on cubing 206 newly fallen trees. With regards to general models, among the double entry equations, *Schumacher-Hall* original model attained the best fit, with a $R^2_{aj} = 0,95$; $S_{yx} = 5,18\%$ and good residues distribution, superior to the single-entry models. *Husch's* logarithmic model was the better fit among the single-entry models, attaining a $R^2_{aj} = 0,95$, $S_{yx} = 11,5\%$ and a good residue distribution. Fitting the equations for the trees in the $10 \leq DAP < 50$ cm diametric class resulted in more precision than the through general equations. The logarithmic double-entry model, $\ln V = a + b \ln DAP^2 HC$, with Spurr's combined variable fitted best ($R^2_{aj} = 0,97$ e $S_{yx} = 4,18\%$). Among the single entry equations in this diametric class the model $\ln V = a + b \ln DAP$ achieved a good performance ($R^2_{aj} = 0,92$ e $S_{yx} = 6,46\%$). Fitting equations to the diametric class $DAP \geq 50$ cm however, resulted in no improvements from the general models. Also three species had equations fitted to them: tauari (*Cariniana sp.*), castanha-sucupira (*Curupira tefeensis*) and anoerá (*Beilschmiedia brasiliensis*). The first two species had good non-linear exponential fit. *Husch's* single-entry equation is recommended for local use in the forest management at the Resex and the is recommended for regional use in other sites of similar forests. The use of newly fallen trees as a data record to generate models is viable and consistent. Cubing the fallen trees in good condition is easy to obtain and execute in tropical forests.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE TABELAS | xi |
| 1. Introdução | 12 |
| 2. Objetivos | 14 |
| 2.1 Geral | 14 |
| 2.2 Específicos..... | 14 |
| 3. Materiais e métodos | 15 |
| 3.1 Localização e caracterização da área..... | 15 |
| 3.2 Coleta de dados | 16 |
| 3.2.1. Inventário e cubagem de árvores caídas..... | 16 |
| 3.2.2. Volume sólido real | 17 |
| 3.2.3. Identificação botânica..... | 18 |
| 3.3. Modelos volumétricos | 19 |
| 3.3.1. Modelos testados | 19 |
| 3.3.2. <i>Equações para espécies madeireiras de importância econômica com uso do método “Jackknife”</i> | 20 |
| 3.3.3. Análise de desempenho | 23 |
| 3.4. Escolha do melhor modelo | 24 |
| 3.5. Modelos logarítmicos versus não logarítmicos | 25 |
| 3.6. Equação única “paralelismo e coincidência das estimativas de volume” | 26 |
| 4. Resultados e discussão | 27 |
| 4.1 Caracterização dos dados | 27 |
| 4.1.1 Distribuição diamétrica e Volume real..... | 27 |
| 4.1.2. Identificação botânica de árvores caída..... | 28 |
| 4.2. Modelos ajustados | 29 |
| 4.2.1 Modelos gerais | 29 |
| 4.2.2 Modelos por classes de diâmetro..... | 37 |
| 4.2.2.1 Classe de diâmetro ($10 \leq \text{DAP} < 50 \text{ cm}$)..... | 37 |
| 4.2.2.2 Classe de diâmetro ($\text{DAP} \geq 50 \text{ cm}$)..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3 Modelos ajustado por espécies madeireiras..... | 48 |
| 4.3 Análise de desempenho | 50 |
| 4.4 Equação única "paralelismo e coincidência das estimativas de volume"..... | 51 |
| 4.5 Recomendação para a cubagem de árvores caídas | 52 |
| 4.6 Aos tomadores de decisão | 54 |
| 5. Conclusões | 56 |
| 6. Referências bibliográficas | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da Resex Auatí-Paraná município de Fonte Boa, Amazonas. (Fonte: IBAMA, 2007)..... | 15 |
| Figura 2. Procedimentos da cubagem rigorosa das árvores caídas na Resex ilustrando: a) foto de árvore recém-caída; b) medição da altura com o uso de trena; c) medição de diâmetro com o uso da suta e d) esquema de cubagem de árvore caída dividindo a altura comercial em 10 partes..... | 18 |
| Figura 3. Amostra anatômica do fuste de árvore caída (disco de 5 cm de espessura) coletada na Resex Auatí-Paraná | 19 |
| Figura 4. Número de indivíduos de árvores caídas (n) distribuído por classes de diâmetro, tipologia florestal (várzea e floresta de terra firme – FTF) e total, amostradas na área da Resex Auatí-Paraná, AM..... | 28 |
| Figura 5. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações lineares..... | 34 |
| Figura 6. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações logarítmicas..... | 35 |
| Figura 7. Gráfico de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações não lineares exponenciais..... | 36 |
| Figura 8. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações lineares na classe diamétrica ($10 < \text{DAP} \leq 50$ cm)..... | 40 |
| Figura 9. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações logarítmicas na classe diamétrica ($10 < \text{DAP} \leq 50$ cm)..... | 41 |
| Figura 10. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações não lineares exponenciais na classe diamétrica ($10 < \text{DAP} \leq 50$ cm)..... | 42 |
| Figura 11. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações lineares na classe diamétrica ($\text{DAP} \geq 50$ cm)..... | 45 |
| Figura 12. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações logarítmicas na classe diamétrica ($\text{DAP} \geq 50$ cm)... | 46 |
| Figura 13. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações logarítmicas na classe diamétrica ($\text{DAP} \geq 50$ cm)..... | 47 |
| Figura 14. Curvas do volume estimados pelas equações: da análise de desempenho (vol. modelo: Higuchi <i>et al.</i> , 1997), equações ajustadas (vol. modelo 5 deste estudo) e volume real obtido na cubagem para a Resex..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Distribuição das árvores caídas após a cubagem em classes de diâmetro (D) e altura total (H) do conjunto de árvores amostradas na Resex Auatí-Paraná..... | 17 |
| Tabela 2. Modelos volumétricos testados para estimativa individual do volume do fuste com casca das árvores cubadas..... | 20 |
| Tabela 3. Estimativas parciais dos coeficientes de regressão para o conjunto de dados da espécie castanha-sucupira ($r=7$) e para sub-grupos com o uso e re-uso de cada indivíduo da espécie (\hat{O}_{-1} até \hat{O}_{-7})..... | 22 |
| Tabela 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para o conjunto de dados da espécie castanha-sucupira ($r=7$)..... | 23 |
| Tabela 5. Modelos volumétricos submetidos análise de desempenho para estimativa individual do volume de árvores, frente ao conjunto de árvores cubadas na Resex Auatí-Paraná..... | 23 |
| Tabela 6. Índices estatísticos aplicados aos modelos volumétricos submetidos à análise de desempenho para estimativa individual do volume de árvores com casca na Resex Auatí-Paraná..... | 24 |
| Tabela 7. Média (x), desvio padrão (s), coeficiente de variação (CV em %) e valores extremos para o conjunto de árvores-amostras (n = 206), na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM). | 27 |
| Tabela 8. Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da média (S_{yx}), erro padrão da estimativa (S_{yx} em %) para os modelos volumétricos gerais, na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM)..... | 30 |
| Tabela 9. Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da média (S_{yx}), erro padrão da estimativa (S_{yx} em %) para os modelos volumétricos na classe de diâmetro ($10 \leq DAP < 50$), na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM)..... | 38 |
| Tabela 10. Coeficientes de regressão, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da média (S_{yx}), erro padrão da estimativa (S_{yx} em %) para os modelos volumétricos na classe de diâmetro ($DAP \geq 50$ cm), na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM). | 43 |
| Tabela 11. Análise descritiva: média (x), desvio padrão (s), coeficiente de variação (CV em %) e valores extremos para o conjunto de árvores-amostras por espécie, na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM)..... | 48 |
| Tabela 12. Equações de volume para espécies madeiras com: número de indivíduos (n), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da média (S_{yx}), erro padrão da estimativa (S_{yx} em %)..... | 48 |
| Tabela 13. Valores dos índices estatísticos de desempenho dos modelos avaliados, sendo: erro médio (\bar{e}) uma medida de tendência; variância média (s^2) uma medida de precisão; raiz quadrada do quadrado médio (\sqrt{QM}) demonstra a exatidão das predições e desvio (D%) afastamento do valor observado | 50 |

1. INTRODUÇÃO

O uso de equações volumétricas, ferramenta básica como suporte ao manejo florestal, é de fundamental importância no planejamento e administração dos recursos na exploração florestal (Higuchi *et al.*, 1997; Baima *et al.*, 2001; Segura e Kanninen, 2005). Os planos de manejo têm o volume de madeira como principal variável de interesse, servindo as equações volumétricas para o controle, fiscalização e monitoramento (Scolforo *et al.*, 2004). Porém é um grande desafio a elaboração e o ajuste de equações de volume para florestas tropicais frente à heterogeneidade de espécies e tipologias destes ecossistemas (Akindele e LeMay, 2006), entre outros fatores de ordem técnica, econômica e operacional (Silva, 1984; Baima *et al.*, 2001; Silva 2007).

Desde a criação da primeira escola de florestas no mundo, na Alemanha em 1811, o setor florestal teve um grande avanço e passou a regular o corte de madeiras com base no volume (Silva e Rosokawa, 1978). Há na literatura diversos estudos desenvolvidos na geração de modelos volumétricos visando a previsão do estoque e determinação do potencial futuro madeireiro de florestas tropicais (p.ex: Spurr, 1952; Heinsdijk e Bastos, 1963; Silva, 1984; Higuchi, 1988; Finger, 1992; Higuchi *et al.*, 1997; Rolim *et al.*, 2006). Durante muitas décadas, pesquisas voltadas ao tema buscaram a elaboração de tabelas de volume, uma prática relativamente antiga na ciência florestal (Machado *et al.*, 2000), para facilitar a exploração florestal em áreas nativas (Higuchi, 1982; Fernandes *et al.*, 1983; Silva *et al.*, 1984), mas principalmente em florestas plantadas (Scolforo, 1998; Machado *et al.*, 2002; Santana e Encinas, 2004). Nestas tabelas usam-se uma ou mais variáveis de entrada, em que o volume é a variável dependente, associado às variáveis independentes de fácil mensuração na floresta, como: diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura (comercial ou total) e fator de forma (referente à forma do fuste da árvore). De acordo com Finger (1992) essas tabelas podem ser classificadas quanto ao número de variáveis independentes: com uma variável (tabelas locais), duas (tabelas padrão), três ou mais (tabelas por classe de forma). A partir da década 80 essas tabelas deixaram de ser usadas com tanta frequência, pela facilidade computacional para obter equações de volume.

Na região Amazônica há uma carência de estudos sobre este tema em função da diversidade de espécies e tipologias florestais (Baima *et al.*, 2001). As equações de volume na região são aplicadas, na maioria das vezes, pela extrapolação de poucos modelos desenvolvidos para algumas regiões à toda bacia amazônica (Higuchi e Ramm, 1985). A aplicação destes

modelos para áreas extensivas é delicada, como demonstrado por Rolim *et al.* (2006), em que os modelos volumétricos desenvolvidos por Silva (1984) e Heinsdijk e Bastos (1963) usados na Flona do Tapirapé-Aquirí, PA, eram menos precisos e subestimavam o volume real em relação aos modelos locais. Portanto trabalhos que consideram escalas menores, dentro de uma abordagem local, são importantes para gerar modelos mais realísticos e ajustados, pois cada sítio florestal possui características próprias inerentes às variações de relevo, clima e vegetação (Higuchi *et al.*, 2004; Rolim *et al.*, 2006).

Três formas mais frequentes são abordadas para gerar equações de volume para florestas tropicais visando absorver a heterogeneidade existente neste ecossistema: 1. equações de volume para espécies individuais, 2. equações de volume para agrupamento de espécies por morfoespécie; e 3. equações gerais para toda a área (Akindele e LeMay, 2006). De acordo com autores supracitados, equações para espécies individuais são difíceis de serem obtidas, muitas vezes por não se ter dados suficientes por espécie para ajustar os modelos e pela alta diversidade de espécies nas florestas tropicais (Avery e Burkhart, 2002).

Equações que consideram, além do DAP, outras variáveis como altura (comercial ou total) e forma da árvore são mais precisas (Silva e Carvalho, 1984; Santos, 1996; Rolim *et al.*, 2006). Uma pergunta que cabe neste sentido é: mais precisas quanto? Muitas vezes, um pequeno aumento de precisão não é justificado pelas perdas econômicas na coleta de outra variável, como por exemplo, a altura (Silva e Carvalho, 1984; Santos, 1996). Além disso, alguns trabalhos recomendam o uso de modelos de simples entrada, tendo somente o DAP como variável independente, pela facilidade de mensuração, evitando-se assim, os erros gerados na coleta da variável altura (Segura e Kanninen, 2005; Silva, 2007). Essas tentativas são de fato importantes, uma vez que reconhece a imprecisão do uso de modelos volumétricos extrapolados para grandes áreas e muitas espécies (Fernandes *et al.*, 1983; Santos, 1996; Baima *et al.*, 2001; Rolim *et al.*, 2006). A confiabilidade das estimativas geradas pelas equações volumétricas depende da representatividade das amostras em relação à área total de inferência e do ajuste do modelo aos dados coletados (Avery e Burkhart, 2002).

Neste contexto, o presente estudo propõe-se a suprir a demanda de informações sobre a volumetria, além de gerar equações de volume para a elaboração do plano de manejo da Reserva Extrativista Auatí-Paraná, bem como para a região do Alto Solimões.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Ajustar modelos volumétricos para a estimativa individual do volume comercial com casca do fuste das árvores ($DAP \geq 10$ cm) na Reserva Extrativista Auatí-Paraná, com o uso de uma nova metodologia para a obtenção do conjunto de árvores-amostra geradoras dos modelos a partir da cubagem de árvores recém-caídas.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar o volume individual de árvores caídas;
- Identificar as espécies botânicas no conjunto das árvores caídas inventariadas;
- Determinar uma equação de volume com casca para a área da Resex;
- Determinar equações de volume com casca para árvores nas classes diâmetricas ($10 \leq DAP < 50$ cm) e ($DAP \geq 50$ cm);
- Determinar equações de volume com casca para espécies florestais madeireiras com potencial econômico, com o uso do método “jackknife”;
- Definir a metodologia de coleta de dados para o desenvolvimento de equações de volume, baseado na cubagem rigorosa de árvores caídas;
- Analisar o desempenho de modelos alométricos para estimativa do volume comercial com casca gerados em outras regiões e aplicados ao novo conjunto de dados deste estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área

Os dados deste trabalho foram coletados na Resex Auatí-Paraná (figura 1) localizada no município de Fonte Boa, mesorregião do Alto Solimões, AM, à margem direita do Rio Solimões, distante 680 km de Manaus em linha reta e 1033 km por via fluvial, a 2° 31' S e 66° 2' O (Segov, 2007).

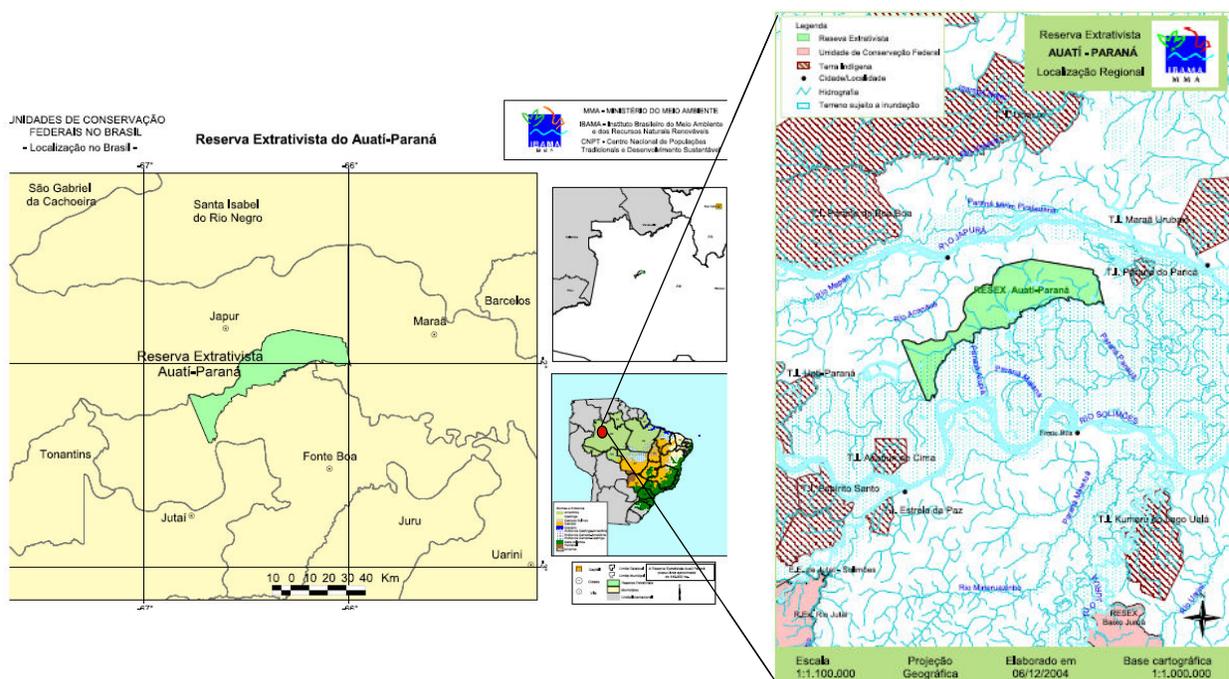


Figura 1. – Localização da Resex Auatí-Paraná município de Fonte Boa, Amazonas. (Fonte: IBAMA, 2007).

A Reserva Extrativista Auatí-Paraná foi criada em 7 de agosto de 2001. Esta unidade de conservação possui uma área de 146.950,46 ha, com uma população extrativista residente de, aproximadamente, 1.500 habitantes, organizada em 15 comunidades. O processo de sua criação emergiu da comunidade motivada por trabalhos da Comissão Pastoral da Terra (CPT) e outros, ligados à igreja católica, além de contar com o apoio do Centro Nacional de Desenvolvimento Sustentado das Populações Tradicionais - CNPT/Ibama (Santos *et al.*, 2004).

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen é do tipo Af, constantemente úmido (RadamBrasil, 1978). Os meses mais secos na região ocorrem de julho a novembro, sendo a precipitação média anual de 2697 mm (RadamBrasil, 1978).

De acordo com Ranzani (1980), predominam os solos Podzólicos Vermelho Amarelo e, subordinados a estes, os Latossolos Amarelos, com predominância de material pelítico. No município de Fonte Boa, os perfis analisados apresentaram características de Latossolos Amarelos álico de relevo plano a suavemente ondulado e solos bem drenados (RadamBrasil, 1978).

A cobertura vegetal da região é constituída por diversas formações diferenciadas (RadamBrasil, 1978). Dentre as mais importantes, encontram-se: Formação Pioneira, Sistema Ecológico da Campinarana, Refúgio Ecológico, Áreas de Tensão Ecológica, Sistema Ecológico da Floresta Tropical Densa e Sistema Ecológico da Floresta Tropical Aberta, sendo as duas últimas as mais encontradas no município de Fonte Boa.

Segundo o IBAMA (2007), a vegetação da Resex é formada por floresta tropical densa, com ambientes de matas de terra firme (caucho, castanha, e buriti), várzea (seringueira, maçaranduba, e louros) e igapó (buriti, breu, e ata do igapó). Santos *et al.* (2004) descrevem como famílias de maior riqueza em espécies amostradas, dentro da área da Resex: *Leguminosae* com 11 espécies (*Leguminosae: Caesalpinioideae* com 3 espécies; *Leguminosae: Mimosoideae* - 5 espécies; *Leguminosae: Papilionoideae* - 3 espécies); *Myristicaceae* com 8 espécies; *Lecythidaceae* e *Sapotaceae* com 7 espécies cada; *Moraceae* com 6 espécies e *Euphorbiaceae* com 5 espécies. Estas seis famílias somam 51% de todas as espécies amostradas na área de estudo.

3.2 Coleta de dados

3.2.1 Inventário e cubagem de árvores caída

Com o objetivo de facilitar a obtenção de árvores-amostra para ajustar as equações de volume, este trabalho utilizou a cubagem de árvores recém-caídas em bom estado de conservação. O inventário dessas árvores foi realizado simultaneamente ao inventário das árvores em pé, dentro das parcelas instaladas na Resex.

As árvores sem decomposição aparente que possibilitavam a obtenção de informações dendrométricas como diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), diâmetros das seções ao longo do fuste,

altura comercial e total foram cubadas rigorosamente, perfazendo um total de 206 árvores caídas com DAP ≥ 10 cm distribuídas em diferentes classes de diâmetro e altura (tabela 1).

Tabela 1. Distribuição das árvores caídas após a cubagem em classes de diâmetro (D) e altura total (H) do conjunto de árvores amostradas na Resex Auatí-Paraná.

| Classe de diâmetro (cm) | Classe de altura total (m) | | | | | | | | Total geral |
|-------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------|
| | 5 – 10 | 10 – 15 | 15 – 20 | 20 – 25 | 25 – 30 | 30 – 35 | 35 – 40 | H \geq 40 | |
| 10 – 20 | 2 | 11 | 17 | 4 | 1 | - | - | - | 35 |
| 20 – 30 | - | 2 | 31 | 12 | 4 | 1 | - | - | 50 |
| 30 – 40 | - | 1 | 6 | 21 | 8 | 2 | - | - | 38 |
| 40 – 50 | - | - | 3 | 15 | 9 | 6 | - | - | 33 |
| 50 – 60 | - | - | 5 | 7 | 6 | 1 | - | - | 19 |
| 60 – 70 | - | - | - | 4 | 4 | - | - | - | 8 |
| 70 – 80 | 1 | - | - | 2 | 3 | 3 | - | 1 | 10 |
| 80 – 90 | - | - | - | - | 3 | 3 | - | - | 6 |
| 90 – 100 | - | - | - | - | 3 | - | - | - | 3 |
| D \geq 100 | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Total geral | 3 | 14 | 62 | 65 | 42 | 17 | 1 | 2 | 206 |

3.2.2 Volume sólido real

O volume individual das árvores cubadas foi obtido por meio da combinação dos métodos: de *Smalian* (medição do diâmetros na base e do topo de cada seção) e de *Hohenald* (divisão relativa do comprimento da seção).

Pela facilidade da árvore estar no chão, mediram-se as alturas comercial (comprimento do fuste até a primeira bifurcação) e altura total com o auxílio de trena métrica. A altura comercial foi dividida em 10 partes (ou seções), sendo que em cada seção foram medidos os diâmetros da base e do topo com o auxílio de uma suta (figura 2d).

O volume de cada seção resulta da multiplicação da área basal média (base e topo) pelo comprimento da seção (1/10 da altura comercial). O somatório dos volumes das 10 seções constitui o volume total da árvore, dado pela fórmula:

$$Vc/c = \frac{\pi}{4} \cdot \left\{ \frac{D_0^2 + D_{10}^2}{2} + D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_9^2 \right\} \cdot \frac{c}{10}$$

Onde: V_c/c = volume comercial com casca (m^3); $D_0, D_1, D_2..$
 D_{10} = diâmetro do cilindro (cm); e c = comprimento de cada seção
 (altura comercial, em m, dividido pela razão 10).

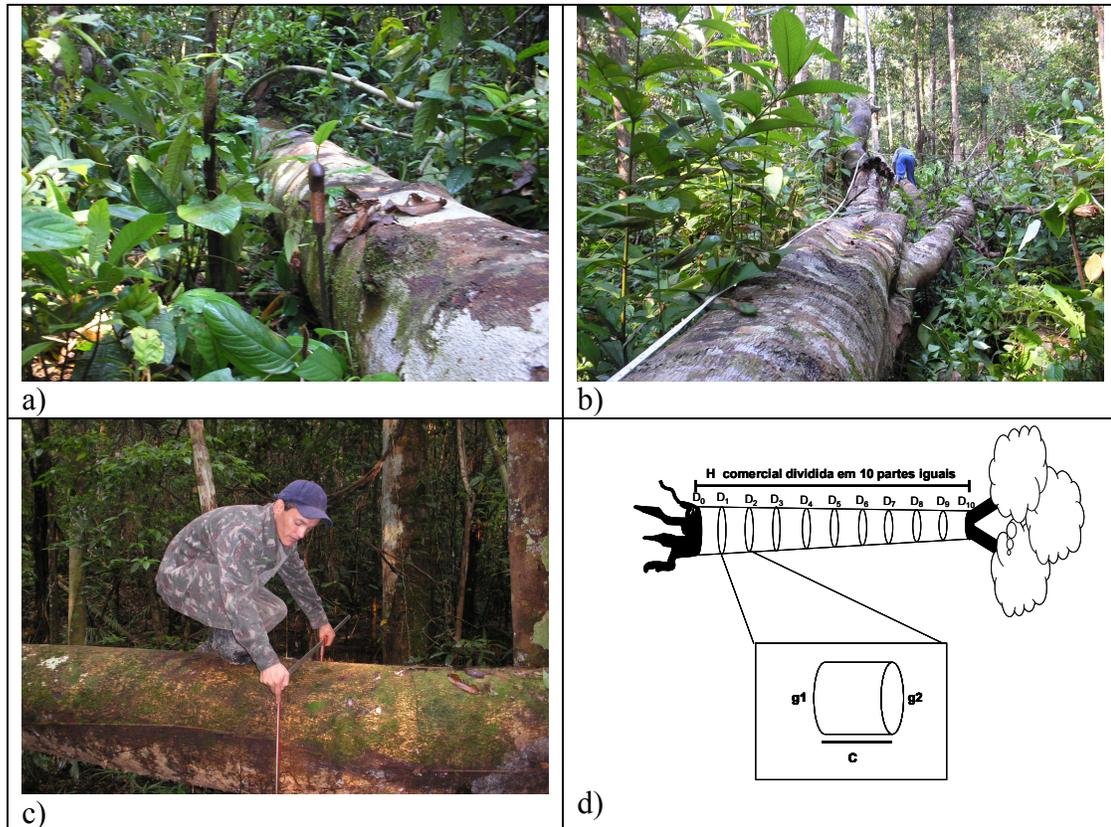


Figura 2. Procedimentos da cubagem rigorosa das árvores caídas na Resex ilustrando: a) foto de árvore recém-caída; b) medição da altura com o uso de trena; c) medição de diâmetro com o uso da suta e d) esquema de cubagem de árvore caída dividindo a altura comercial em 10 partes.

3.2.3 Identificação Botânica

Para garantir uma correta identificação botânica da madeira caída sabendo-se das dificuldades em função da falta de materiais botânicos (folhas, flores e frutos) foi coletada uma amostra de madeira (disco de 5 cm de espessura) das árvores cubadas que possibilitavam tal coleta (figura 3). As amostras foram encaminhadas para identificação no Laboratório de Anatomia da Madeira – Coordenação em Pesquisas de Produtos Florestais - CPPF/INPA.



Figura 3. Amostra anatômica do fuste de árvore caída (disco de 5 cm de espessura) coletada na Resex Auatí-Paraná.

3.3 Modelos volumétricos

3.3.1 Modelos testados

Dezoito modelos volumétricos, de freqüente uso na mensuração florestal, foram ajustados para a obtenção do volume individual com casca para as árvores cubadas (tabela 2). Sendo ajustados modelos gerais para toda a vegetação da Resex, por classe diamétrica ($10 \leq \text{DAP} < 50$ cm; $\text{DAP} \geq 50$ cm) e para espécies florestais madeiras de importância econômica identificadas entre as árvores caídas.

Os modelos lineares foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados; os modelos não lineares pelo método de quadrados mínimos não lineares, com o uso do algoritmo *Gauss-Newton* para aproximação linear (Bates e Watts, 1988). Em cada modelo testado foram aplicadas análises de variância (teste F) e teste de significância dos coeficientes (teste t) de acordo com Draper e Smith (1996), Neter e Wasserman (1974) e Weiss e Hassett (1982), utilizando o pacote estatístico SYSTAT (versão 10.0).

Tabela 2. Modelos volumétricos testados para estimativa individual do volume do fuste com casca das árvores cubadas.

| Número | Modelos | Autor |
|--------|--|-------------------------------|
| 1 | $V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \varepsilon_i$ | Dissescu-Stanescu |
| 2 | $V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 + \varepsilon_i$ | Kopezky-Gehardt |
| 3 | $V = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} + \varepsilon_i$ | |
| 4 | $V = \beta_0 (\text{DAP}^2)^{\beta_1} + \varepsilon_i$ | |
| 5 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \varepsilon_i$ | Husch |
| 6 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP}^2 + \varepsilon_i$ | |
| 7 | $V = \beta_0 + \beta_1 (\text{DAP}^2 \text{HC}) + \varepsilon_i$ | Spurr |
| 8 | $V = \beta_0 + \beta_1 (\text{DAP}^2 \text{HT}) + \varepsilon_i$ | Spurr |
| 9 | $V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{HC} + \varepsilon_i$ | |
| 10 | $V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{HT} + \varepsilon_i$ | |
| 11 | $V = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \text{HC}^{\beta_2} + \varepsilon_i$ | Schumacher-Hall (original) |
| 12 | $V = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \text{HT}^{\beta_2} + \varepsilon_i$ | Schumacher-Hall (original) |
| 13 | $V = \beta_0 (\text{DAP}^2 \text{HC})^{\beta_1} + \varepsilon_i$ | |
| 14 | $V = \beta_0 (\text{DAP}^2 \text{HT})^{\beta_1} + \varepsilon_i$ | |
| 15 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln (\text{DAP}^2 \text{HC}) + \varepsilon_i$ | Spurr Logarítmica |
| 16 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln (\text{DAP}^2 \text{HT}) + \varepsilon_i$ | Spurr Logarítmica |
| 17 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln \text{HC} + \varepsilon_i$ | Schumacher-Hall (logarítmica) |
| 18 | $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln \text{HT} + \varepsilon_i$ | Schumacher-Hall (logarítmica) |

Onde: V = volume comercial de cada árvore (m³); DAP=diâmetro a 1,30 m do nível do solo (cm); HT = altura total de cada árvore (m); HC = altura comercial (m); β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes de regressão; ε_i = erro aleatório; ln = logaritmo natural.

3.3.2 Equações para espécies madeireiras de importância econômica com uso do método “Jackknife”

Para as três espécies (tauari, anoerá e castanha-sucupira) que tiveram maior número de indivíduos na amostragem das árvores caídas (anexo 1), ajustou-se uma equação de volume submetida ao método “jackknife” com base nos procedimentos e referencial teórico apresentados por Higuchi (1992). As etapas descritas por este autor consistem: *i*) ter um conjunto de dados através da medição do DAP (truncadas a um determinado DAP) dentro de unidades amostrais, aleatoriamente, selecionadas da área a ser inventariada; *ii*) ordenar em ordem crescente todos os valores de DAP medidos; *iii*) usar a ordem estatística para selecionar as árvores que serão derrubadas para obtenção do volume real e *iv*) usar os procedimentos normais da regressão de acordo com a metodologia do método “jackknife” para obter as estimativas necessárias. A etapa

iii) supracitada foi adaptada neste trabalho em função da coleta dos dados serem feitas em árvores caídas para obtenção do volume real, não sendo executada a derrubada de árvores.

De acordo com Yang e Kung (1983), as árvores para os subgrupos que serão submetidos ao “jackknife”, podem ser selecionadas usando a ordem estatística, principalmente, se a amostra for grande. Higuchi (1992) usou a progressão geométrica para selecionar as árvores individuais para montar o subconjunto a ser submetido ao “jackknife”. Como foi verificado um pequeno número de indivíduos para as três espécies analisadas ($n < 30$), foram utilizados todos os indivíduos da espécie como conjunto de dados geradores do modelo submetido ao “jackknife”, sem a retirada aleatória de um subconjunto.

A equação não linear exponencial de única entrada foi ajustada para cada espécie, porque exige apenas o DAP como variável independente, de fácil mensuração e apresenta bom ajuste entre os modelos testados.

Com base no conjunto de dados de cada espécie: anoerá ($n= 9$), tauari ($n= 12$) e castanha-sucupira ($n= 7$) foram obtidas as estimativas parciais dos coeficientes de regressão por meio do processamento dos dados no pacote estatístico Systat (versão 10.0). Com estas estimativas calculam-se os pseudo-valores dos coeficientes. As estimativas dos coeficientes de regressão final que serão utilizados nos modelos foram obtidas por meio da média dos pseudo-valores.

Os procedimentos para os cálculos dos coeficientes de regressão submetidos ao método “jackknife” para pequenas amostras ($n < 30$) foram demonstrados, tendo como exemplo o conjunto de dados da espécie castanha-sucupira ($n= 7$) no total de árvores cubadas ($n= 206$) na Resex.

Foi realizada a análise de regressão para o conjunto ($r= 7$) da espécie obtendo a estimativa do coeficiente para o conjunto. Após, retira-se a árvore um do conjunto (\hat{O}_{-1}) e roda novamente a análise de regressão obtendo-se a estimativa parcial dos coeficientes para o conjunto sem a árvore um. Na seqüência retorna-se com a árvore um para o conjunto de dados e retira-se a árvore dois (\hat{O}_{-2}) obtendo-se as estimativas para o conjunto sem a árvore dois, retornando-se após a árvore dois e assim procedendo para as demais árvores do conjunto. Isso explica a questão do uso e re-uso da árvore na amostra, uma vez que, um mesmo indivíduo participa em vários sub-grupos do conjunto. Também obtém-se a estimativa para todo o conjunto de árvores cubadas ($n= 206$) como demonstrado na tabela 3.

Tabela 3. Estimativas parciais dos coeficientes de regressão para o conjunto de dados da espécie castanha-sucupira ($r=7$) e para sub-grupos com o uso e re-uso de cada indivíduo da espécie (\hat{O}_{-1} até \hat{O}_{-7}).

| Conjuntos | a | b |
|----------------|----------|----------|
| $r=7$ | 0,000382 | 2,200433 |
| \hat{O}_{-1} | 0,000551 | 2,118515 |
| \hat{O}_{-2} | 0,000271 | 2,276981 |
| \hat{O}_{-3} | 0,000373 | 2,205625 |
| \hat{O}_{-4} | 0,000386 | 2,198105 |
| \hat{O}_{-5} | 0,000400 | 2,190175 |
| \hat{O}_{-6} | 0,000384 | 2,199250 |
| \hat{O}_{-7} | 0,007348 | 1,323547 |
| $n=206$ | 0,001481 | 1,891552 |

\hat{O} = estimativa para r conjunto (árvores individuais)

\hat{O}_{-j} = estimativa parcial excluindo a j -ésima árvore do conjunto.

Com estas estimativas parciais dos coeficientes de regressão calculam-se os pseudo-valores, por meio do uso da seguinte fórmula:

$$\hat{O}^*_{-j} = \text{pseudo valor} = r * \hat{O} - (r-1) \hat{O}_{-j} \text{ para } j = 1, 2, \dots, r$$

Aplica-se esta fórmula com base nos dados parciais das estimativas dos coeficientes da espécie castanha-sucupira (tabela 3) para os cálculos dos pseudo-valores do *coeficiente a*:

$$\hat{O}^*_{-1} = (7 * 0,000382) - (7-1) * 0,000551 = -0,000632$$

$$\hat{O}^*_{-2} = (7 * 0,000382) - (7-1) * 0,000271 = 0,001048$$

-

$$\hat{O}^*_{-7} = (7 * 0,000382) - (7-1) * 0,007348 = -0,041414$$

Os mesmos procedimentos são adotados para o cálculo do *coeficiente b*:

$$\hat{O}^*_{-1} = (7 * 2,200433) - (7-1) * 2,118515 = 0,000632$$

$$\hat{O}^*_{-2} = (7 * 2,200433) - (7-1) * 2,276981 = 0,001048$$

-

$$\hat{O} * 7 = (7 * 2,200433) - (7-1) * 1,323547 = 0,041414$$

A estimativa dos coeficientes de regressão final que serão usados nos modelos foram obtidas por meio da média dos pseudo-valores (tabela 4).

Tabela 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para o conjunto de dados da espécie castanha-sucupira ($r=7$).

| Pseudo Valores | a | b |
|----------------|------------|----------|
| $\hat{O} * 1$ | - 0,000632 | 2,691941 |
| $\hat{O} * 2$ | 0,001048 | 1,741145 |
| $\hat{O} * 3$ | 0,000436 | 2,169281 |
| $\hat{O} * 4$ | 0,000358 | 2,214401 |
| $\hat{O} * 5$ | 0,000274 | 2,261981 |
| $\hat{O} * 6$ | 0,000370 | 2,207531 |
| $\hat{O} * 7$ | - 0,041414 | 7,461749 |
| média | - 0,005651 | 2,964004 |

Sendo a equação ajustada no final com o valor da média ($V = 0,005651 * DAP^{2,964004}$). O valor do coeficiente de determinação, erro padrão e erro padrão da estimativa é a média dos valores obtidos para cada sub-grupo.

3.3.3 Análise de desempenho

Os melhores modelos volumétricos desenvolvidos por Fernandes *et al.* (1983), Higuchi e Ramm (1985) e Higuchi *et al.* (1997) foram testados com o novo arquivo de dados da Resex Auatí-Paraná (tabela 3), com o objetivo de avaliar a estabilidade e o desempenho destes modelos frente à nova base de dados. Os modelos testados já foram comprovados em outros sítios de pesquisas e, por esta razão, têm chances reais de repetirem os desempenhos também neste estudo.

Tabela 5. Modelos volumétricos submetidos à análise de desempenho para estimativa individual do volume de árvores, frente ao conjunto de árvores cubadas na Resex Auatí-Paraná.

| n | Equações | Autor |
|---|--|--------------------------------|
| 1 | $\ln V = -7,335 + 2,121 \ln DAP$ | Higuchi <i>et al.</i> (1997) |
| 2 | $\ln V = 0,072 + 2,096 \ln DAP + 0,836 \ln HC$ | Higuchi e Ramn (1985) |
| 3 | $V = 3,2917076 DAP^{2,15715791} HC^{0,42020427}$ | Fernandes <i>et al.</i> (1983) |

Para avaliar a estabilidade e o desempenho destes modelos foram utilizados os índices estatísticos (tabela 6), baseados no trabalho de Mello e Batista (2002) adaptados da metodologia de Prodan *et al.* (1997) para validação preditiva de modelos volumétricos. Sendo o erro médio (\bar{e}) uma medida de tendência; variância média (s^2) uma medida de precisão e raiz quadrada do quadrado médio (\sqrt{QM}) demonstra a exatidão das predições.

Tabela 6. Índices estatísticos aplicados aos modelos volumétricos submetidos à análise de desempenho para estimativa individual do volume de árvores com casca na Resex Auatí-Paraná.

| Índices estatísticos | Formula |
|---|--|
| Erro médio (\bar{e}) | $e = \frac{\sum_{i=1}^n \ell_i}{n}$ |
| Variância dos erros (\bar{s}^2) | $\bar{s}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ell_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}$ |
| Raiz quadrada do quadrado médio do erro (\sqrt{QM}) | $QM = \sqrt{\bar{e}^2 + \bar{s}^2}$ |

Onde: ℓ_i = diferença entre o volume real e estimado; n = número de árvores

Ainda, foi observado o desvio (afastamento) em %, do volume (V) médio estimado pelas diferentes equações, em relação ao volume médio observado (Higuchi *et al.*, 1998), dado pela fórmula:

$$\text{Desvio} = (D\%) = (V. \text{médio observado} - V. \text{médio estimado}) / V. \text{médio observado} * 100$$

3.4 Escolha do melhor modelo

Para a escolha do melhor modelo estatístico foram adotados os procedimentos tradicionais da ciência florestal, de acordo com Draper e Smith (1966) e Santos (1996).

Os indicadores de qualidade do modelo foram: maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), menor erro padrão de estimativa (S_{yx} em %) e melhor distribuição de resíduos.

A análise de variância para regressão foi aplicada para verificar a significância dos modelos. O R^2_{aj} indica o quanto da variação dos dados é explicado pelo modelo. O S_{yx} demonstra

a precisão do modelo, sendo que para se ter a dimensão exata da precisão do modelo, este erro tem que ser calculado em relação à média da variável dependente, através da fórmula:

$$\text{Erro (\%)} = [(\text{EPE} / \sqrt{n}) / \text{média}] * 100$$

Onde: EPE = erro padrão da estimativa; n= número de amostras; média = volume observado

Em inventários florestais, o erro (%) aceitável é de 10%. Quanto menor o erro, mais preciso é o modelo. A distribuição de resíduos indica a consistência do modelo e tem que ser uniforme, independentemente, do tamanho das árvores. A decisão final sobre o melhor modelo dependerá ainda dos custos de coletas das variáveis independentes durante o inventário florestal.

3.5 Modelos logarítmicos versus não logarítmicos

Em geral, na saída (output) da maioria dos pacotes estatísticos, o erro padrão de estimativa (EPE) do modelo logarítmico é apresentado com base no logaritmo, natural (ln) ou na base 10 (log). Nos modelos logarítmicos, a variável dependente é ln V (logaritmo do volume) e nos não logarítmicos é o V (volume). O ln V é uma boa variável dependente, mas não tem o menor sentido prático porque a comunicação entre madeireiros, por exemplo, é sempre feita por meio do volume. Portanto, o ln V tem que ser transformado em volume, que é real e permite a caracterização empírica.

Na literatura, há vários índices recomendados para corrigir o erro padrão de estimativa de modelos logarítmicos. Os principais são: (i) Índice de Furnival: $(\text{EPE}) * \exp(\Sigma \ln V/n)$; - Furnival (1961); (ii) Sprugel: $(\text{EPE}) * \exp(\text{EPE}^2 / p)$; onde p = número de coeficientes; - Sprugel (1983); e (iii) Santos: $(\text{EPE}) * \exp(\text{QMR}/2)$; onde QMR = quadrado médio dos resíduos; - Santos (1996). Nos três casos, o fator de correção é o exponencial ou o anti-logaritmo da média dos valores transformados em logarítmicos ou do erro (Syx%) e o erro corrigido é o erro estimado multiplicado por este fator.

Estes índices são recomendados apenas quando há necessidade de comparar os desempenhos de modelos logarítmicos e não logarítmicos. Quando modelos não logarítmicos não são envolvidos, estes índices são, completamente, ignorados. Os erros são sempre muito pequenos. O índice de Furnival, por exemplo, corrige com base no inverso do ln V médio. Sendo

assim, corrigir o EPE com base apenas na variável dependente não é suficiente; a combinação da variável dependente com as independentes tem que ser levada em consideração.

Neste trabalho, o erro padrão de estimativa foi calculado com base na aplicação do modelo logarítmico aos dados originais, proposto por Silva (2007). A soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*), o quadrado médio dos resíduos (*MQR*) e o EPE serão calculados, respectivamente, por meio das seguintes fórmulas:

$$SQR = (V \text{ estimado pelo modelo} - V \text{ observado})^2;$$

$MQR = SQR / (n - c)$, onde: c = número de coeficientes do modelo e n = número de amostras;

$$EPE = \sqrt{MQR} = \text{desvio padrão}$$

3.6 Equação única “paralelismo e coincidência das estimativas de volume”

Após a escolha do melhor modelo entre os ajustados para o manejo da Resex (pelos critérios propostos), e o melhor da análise de desempenho dos três modelos desenvolvidos em outra região e aplicados ao novo conjunto de dados foi analisada a possibilidade de usar uma única equação. Para tanto foram aplicados procedimentos baseados em Thomas *et al.* (2006) por meio do teste Qui-quadrado (χ^2), com nível de significância (α) de 0,01, utilizando-se a equação:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (V1 - V2)^2 / V1$$

Em que: $V1$ = volume com casca (m^3) estimado pela melhor equação da análise de desempenho frente ao conjunto de dados da Resex; $V2$ = volume com casca (m^3) estimado pelo melhor modelo ajustado para a Resex.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos dados

4.1.1 Distribuição diamétrica e Volume real

Observa-se na tabela 7 o comportamento das variáveis dendrométricas e o volume real coletado no conjunto de 206 árvores recém-caídas que foram rigorosamente cubadas na área da Resex Auatí-Paraná. O volume real total das árvores cubadas foi de 384,7 m³, com média de 1,87 m³ árvore. Há uma grande variação na amplitude das variáveis DAP e volume, como demonstrado pelo alto valor do coeficiente de variação, o que para a Amazônia é considerado normal. Higuchi *et al.* (1998) usando um banco de dados com 315 árvores de DAP \geq 5 cm coletadas na Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST), Manaus, para estimar a biomassa de árvores em pé, observaram alta variabilidade nas variáveis descritoras: DAP, altura total e peso total, CV em %: 96, 45 e 290 respectivamente. Assim como o peso (kg) teve a maior variabilidade natural constatado por estes autores, o volume com casca (m³) possui a maior variação dentro do conjunto de dados observado neste trabalho.

Tabela 7. Média (x), desvio padrão (s), coeficiente de variação (CV em %) e valores extremos para o conjunto de árvores-amostras (n = 206), na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM).

| Variável | x | s | CV (%) | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| DAP (cm) | 39,35 | 23,26 | 59,13 | 10 | 180 |
| Altura total (m) | 22,03 | 5,94 | 26,97 | 7,9 | 48 |
| Altura comercial (m) | 12,62 | 4,06 | 32,17 | 5,3 | 32 |
| Volume c/c (m ³) | 1,87 | 3,05 | 163,37 | 0,05 | 24,96 |

A distribuição do conjunto de dados geradores dos modelos em classes de diâmetro evidencia uma maior concentração de árvores caídas nas classes de menor diâmetro e na tipologia de floresta de terra firme. O maior DAP encontrado na amostragem foi de 180 cm, com apenas quatro árvores com DAP \geq 100 cm. Das árvores caídas amostradas 24,3% pertencem à classe de diâmetro (20 < DAP < 30 cm), e 75,7% (frequência acumulada) dos indivíduos cubados estão entre as quatro primeiras classes de diâmetro (figura 4). O maior número de árvores caídas “mortas” na classe de 20 a 30 cm de diâmetro está de acordo com dados observado por Higuchi

et al. (2004) estudando a dinâmica de florestas na Amazônia Central, onde o diâmetro médio das árvores mortas foi de 27 cm.

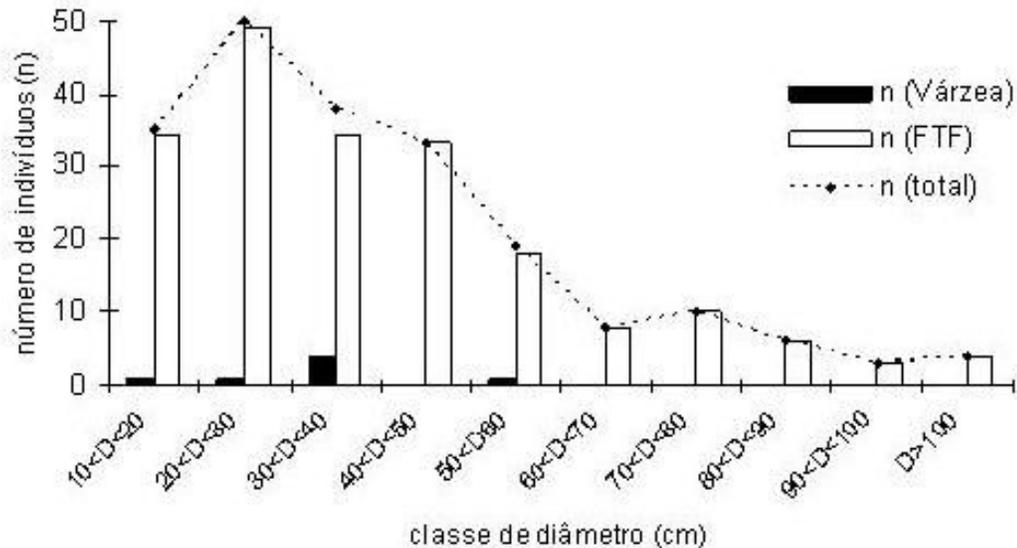


Figura 4. Número de indivíduos de árvores caídas (n) distribuído por classes de diâmetro, tipologia florestal (várzea e floresta de terra firme – FTF) e total, amostradas na área da Resex Auati-Paraná, AM.

Esse desbalanceamento nos dados pode aumentar a variância, ocasionando problemas no ajuste de equações de volume para classes de diâmetro e tipologias. Normalmente árvores de pequenos diâmetros apresentam pouca variação em volume, sendo maior em grandes árvores, o que leva a uma diminuição da homogeneidade dos dados. Cunia (1964) demonstrou que a variância do volume possui uma relação crescente com o diâmetro. Silva e Carvalho (1984) recomendam a coleta de um número balanceado de indivíduos nas classes de diâmetro para melhorar as estimativas do volume de madeira pelos modelos.

4.1.2 Identificação botânica de árvores caídas

Entre as árvores caídas cubadas foram identificadas 53 espécies, distribuídas em 42 gêneros e 21 famílias botânica. Do total de indivíduos amostrados de árvores caídas (n=206) foram identificadas 95 árvores, ficando o restante indeterminado (Anexo 1). As três espécies: tauari (n= 12), anoerá (n= 9), e castanha-sucupira (n= 8) apresentaram o maior número de indivíduos entre as espécies identificadas. Higuchi *et al.* (1985) no projeto “Manejo Ecológico e Exploração da Floresta Tropical Úmida” sobre a presença de árvores caídas e/ou mortas em pé, estas aparecem

com um percentual de 12,5% da frequência total, sendo as espécies mais frequentes: tachi-vermelho (*Sclerolobium sp*), matamatá (*Eschweilera sp*), abiurana (*Micropholis mensalis* (Baehni) Aubr.) e piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon* W. Rodr.).

A identificação botânica das árvores caídas é difícil pela ausência, na maioria das vezes, de materiais reprodutivos (flores e frutos) e vegetativo (folhas), sendo por isso também dispendiosa e cara, pois exige a coleta e análise de material anatômico do tronco. Porém vale ressaltar a importância da mesma, dando suporte para geração de equações de volume para espécies específicas, e permitindo a valoração e uso adequado dessa madeira caída dentro de projetos de manejo com as comunidades.

Baima *et al.* (2001) colocam a importância de aumentar o esforço na geração de modelos volumétricos para espécies madeiras de potencial econômico, sendo poucos os trabalhos que desenvolveram equações para espécies ou grupos de espécies. Entre esses trabalhos, por exemplo: Higuchi e Ramm (1985) geraram equações de volume com casca para as três famílias mais abundantes em florestas de terra firme na região de Manaus, AM, sendo a equação de *Schumacher-Hall* a mais ajustada. Silva e Carvalho (1984) desenvolveram uma equação volumétrica para a espécie *Vochysia máxima*, em florestas secundárias no Planalto Tapajós-Belterra, PA, devido a sua importância madeireira e abundância na região. Para um levantamento completo das espécies e regiões que possuem equações de volumes geradas, consultar o trabalho de Baima *et al.* (2001).

4.2 Modelos ajustados

4.2.1 Modelos gerais

Todas as equações foram altamente significativas com altos valores de F e $p < 0,01$ (anexo 2), altos coeficientes de determinação (R^2_{aj}) e baixas estimativas de erros (S_{yx}). Baima *et al.* (2001) mostraram que a precisão obtida para equações de volume desenvolvidas para regiões da Amazônia e diversas espécies variam entre 4% e 21%. Os valores obtidos no presente estudo estão dentro desta faixa, só que melhor ajustados com erros 9,6% mais baixos que o limite superior proposto por estes autores (tabela 8).

Entre os modelos gerais, as equações de dupla entrada, modelos do n° 7 a 18 foram mais precisas que as equações de única entrada. Os modelos de simples entrada, n° de 1 a 6 apresentaram indicadores inferiores aos de dupla entrada, mas aceitáveis, explicando de 77 a 95% da variação dos dados e com erros padrões da estimativas, menores de 11,5% (tabela 8).

Baima *et al.* (2001) atribuíram o melhor ajuste das equações de dupla entrada ao fato do diâmetro e da altura (comercial e total) estarem altamente correlacionados com volume, onde as equações de dupla entrada desenvolvidas para a floresta de terra firme em Moju, PA, estimaram melhor o volume. Silva *et al.* (1984), na Floresta Nacional de Tapajós, obtiveram melhor ajuste para as modelos de dupla entrada, tendo com a equação de *Schumacher-Hall* logaritmizada os melhores indicadores de qualidade, maior coeficiente de determinação, menor erro padrão da estimativa e boa distribuição dos resíduos.

Tabela 8. Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da média (S_{yx}), erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) para os modelos volumétricos gerais, na Resex de Auatí-Paraná, Fonte Boa (AM).

| Modelos | a | b | C | R^2_{aj} | S_{yx} | $S_{yx}\%$ |
|--|------------|----------|-----------|------------|----------|------------|
| 1. $V = a + b \text{ DAP}$ | -2,552732 | 0,111708 | | 0,77 | 0,11 | 11,43 |
| 2. $V = a + b \text{ DAP}^2$ | -0,003792* | 0,000885 | | 0,84 | 0,09 | 9,82 |
| 3. $V = a \text{ DAP}^b$ | 0,001382 | 1,903898 | | 0,85 | 0,09 | 9,72 |
| 4. $V = a (\text{DAP}^2)^b$ | 0,001382 | 0,951948 | | 0,85 | 0,09 | 9,72 |
| 5. $\ln V = a + b \ln \text{DAP}$ | -8,108404 | 2,260256 | | 0,95 | 0,11 | 11,5 |
| 6. $\ln V = a + b \ln \text{DAP}^2$ | -8,108404 | 1,130128 | | 0,95 | 0,11 | 11,5 |
| 7. $V = a + b (\text{DAP}^2 \text{ HC})$ | 0,315523 | 0,475805 | | 0,91 | 0,06 | 6,46 |
| 8. $V = a + b (\text{DAP}^2 \text{ HT})$ | 0,156964 | 0,311412 | | 0,90 | 0,08 | 8,1 |
| 9. $V = a + b \text{ DAP} + c \text{ HC}$ | -3,451229 | 0,102330 | 0,100417 | 0,78 | 0,10 | 10,96 |
| 10. $V = a + b \text{ DAP} + c \text{ HT}$ | -2,793417 | 0,109228 | 0,015354* | 0,77 | 0,11 | 11,42 |
| 11. $V = a \text{ DAP}^b \text{ HC}^c$ | 0,000135 | 1,656946 | 1,220941 | 0,94 | 0,05 | 5,18 |
| 12. $V = a \text{ DAP}^b \text{ HT}^c$ | 0,000013 | 1,847124 | 1,462713 | 0,93 | 0,06 | 5,96 |
| 13. $V = a (\text{DAP}^2 \text{ HC})^b$ | 0,767629 | 0,862938 | | 0,93 | 0,05 | 5,76 |
| 14. $V = a (\text{DAP}^2 \text{ HT})^b$ | 0,401555 | 0,934036 | | 0,90 | 0,07 | 7,98 |
| 15. $\ln V = a + b \ln (\text{DAP}^2 \text{ HC})$ | -0,453670 | 0,952863 | | 0,98 | 0,06 | 6,38 |
| 16. $\ln V = a + b \ln (\text{DAP}^2 \text{ HT})$ | -0,989521 | 0,951756 | | 0,96 | 0,08 | 8,04 |
| 17. $\ln V = a + b \ln \text{DAP} + c \ln \text{HC}$ | -9,152903 | 1,948463 | 0,861403 | 0,98 | 0,06 | 6,86 |
| 18. $\ln V = a + b \ln \text{DAP} + c \ln \text{HT}$ | -9,316195 | 2,017438 | 0,676221 | 0,96 | 0,08 | 8,66 |

*coeficientes não significativos pelo test t ($p > 0,05$).

As equações de dupla entrada obtiveram melhores ajustes que as equações de simples entrada, com maiores R^2_{aj} variando de 0,77 a 0,98 e menores S_{yx} entre 5,18 a 11,42%, sendo para as equações de simples entrada observado menor R^2_{aj} variando de 0,77 a 0,95 e maiores S_{yx} entre

9,72 a 11,5%. O mesmo padrão foi observado por Rolim *et al.* (2006) utilizando 12 modelos volumétricos analisados na Flona do Tapirapé-Aquiri, PA, em que os modelos de simples entrada apresentaram R^2_{aj} variando entre 0,82 a 0,91, sendo estes, menores que os encontrados utilizando as equações de dupla entrada (0,98 a 0,99).

Entre os modelos de dupla entrada o modelo 11 que é a equação de *Schumacher-Hall*, na forma original, observou-se os melhores indicadores (tabela 8), e boa distribuição dos resíduos com leve tendência em superestimar o volume (figura 7), sendo superior aos modelos logarítmicos que normalmente são os melhores ajustados.

O modelo logarítmico de *Schumacher-Hall* para expressar o volume de madeira em função do diâmetro e altura tem sido apontado como o mais eficiente para descrever esta relação funcional, principalmente em florestas plantadas (Guimarães e Leite, 1996). Há muitos anos esta equação tem sido a mais empregada no setor florestal, em função de sua boa estimativa e ausência de tendência na distribuição dos resíduos. Os modelos logarítmicos têm sido indicados para estimar o volume de madeira de florestas tropicais (Silva *et al.*, 1984; Higuchi e Ramm, 1985; Rolim *et al.*, 2006), mas observa-se em outros estudos realizados em sítios florestais na região amazônica bom ajuste de equações não lineares exponenciais (Fernandes *et al.*, 1983; Silva 2007), como também encontrado neste estudo. O uso de modelos ponderados pela função logarítmica exige cuidados no viés de transformação desta equação, discrepância logarítmica, ao se transformar o volume obtido na forma $(\ln V)$ para volume aritmético (V) . Normalmente corrigido pelo índice de Furnival, que retorna através da função anti-logarítmica, uma média geométrica do volume, diferente da média aritmética (Silva, 2007).

A equação exponencial de dupla entrada (equação 13) com o volume em função da variável combinada de *Spurr*, obteve-se bons indicadores (tabela 8). De acordo com Silva *et al.* (1984) a combinação das duas variáveis $(DAP^2 H)$, na forma do quadrado do diâmetro multiplicado pela altura, comercial ou total, é altamente correlacionada com o volume. Mas, a análise gráfica dos resíduos mostra uma tendência em super estimar o volume de pequenas árvores (figura 7).

Entre as equações de simples entrada, os modelos 3 e 4, equações exponencial com o volume em função do DAP e do DAP^2 respectivamente, obtiveram os menores erros de estimativas (tabela 6). Porém, a distribuição gráfica dos resíduos foi tendenciosa (figura 7), superestimando o volume das árvores de menor diâmetro $(DAP < 40 \text{ cm})$. A avaliação gráfica da distribuição dos resíduos é indispensável na análise da escolha do melhor modelo, como

apresentado por Machado *et al.* (2002), mesmo que os critérios de ajustes (R^2_{aj} , $S_{yx}\%$) sejam satisfatórios. Deve-se ter cuidado no uso destas equações (3 e 4) na estimativa do volume para árvores de menores diâmetros. O modelo 2, a equação de *Kopezky-Gehrhardt* foi bem ajustada ($R^2_{aj} = 0,84$) e precisa ($S_{yx} = 9,82\%$). Porém, com tendência na distribuição dos resíduos em superestimar o volume para árvores com DAP < 20 cm exigindo precaução no seu uso para árvores neste intervalo de diâmetro (figura 5). E também, apresentou o *coeficiente a* “constante” não significativo, o que pode ser problemas de multicolinearidade como observado por Oliveira *et al.* (2005) no ajuste do modelo de *Spurr (1952)* para fragmentos florestais naturais do município de Viçosa, Minas gerais.

Como opção a estas equações (2, 3 e 4) pode-se utilizar o modelo de *Husch* a equação 5, e a equação 6 que, no conjunto dos indicadores, foram os melhores modelos de simples entrada, com valores de erros pouco superiores (1,78%) aos modelos supracitados, mas apresentam altos coeficientes de determinação e boa distribuição dos resíduos (figura 6). Conseqüentemente, pela simplicidade operacional da equação 5 recomenda-se o seu uso. Rolim *et al.* (2006) também apresentam como opção o uso da equação de *Husch*, frente ao modelo de dupla entrada (*Shumacher-Hall*), que melhor se ajustou na área de seu estudo, na Serra dos Carajás, PA.

A distribuição dos resíduos para os modelos lineares foi tendenciosa para as árvores de pequeno porte (DAP < 40 cm), com alguns modelos subestimando ou superestimando o volume de madeira, exceto para o modelo de *Kopezky-Gehrhardt* ($V=a +b*DAP^2$) que apresentou menor tendência na distribuição de resíduos (Figura 5). De acordo com Silva *et al.* (1984) o quadrado do diâmetro é altamente correlacionado com o volume, o que justifica esta maior aleatoriedade na distribuição dos resíduos. A distribuição não aleatória dos resíduos nas equações lineares é esperada, conforme Rolim *et al.* (2006) observaram para os quatros modelos de simples entrada testados por estes autores, pois estes modelos assumem que árvores de mesmo diâmetro têm a mesma altura, fato que não é verdadeiro para florestas nativas.

A distribuição de resíduos das equações não lineares logarítmicas, modelos de simples e dupla entrada, foram boas com baixo viés na estimativa do volume ao longo da variação diamétrica, destacando a equação de *Schumacher-Hall* tanto para a altura comercial como total (figura 6). Segundo Silva *et al.* (1984) o melhor ajuste das equações logarítmicas aos dados pressupõe a falta de homogeneidade de variâncias, fato em geral observado no ajuste de equações para florestas tropicais.

As equações não lineares exponenciais apresentaram má distribuição dos erros, com tendência de as equações de simples entrada em superestimar o volume das árvores de menores diâmetros ($DAP < 40$ cm). As equações de dupla entrada foram melhor na distribuição dos resíduos, em especial a equação de *Schumcher e Hall* na forma original ($V=a*DAP^b *HC^c$) que obteve uma boa distribuição dos erros, confirmando sua melhor performance neste estudo (figura 7).

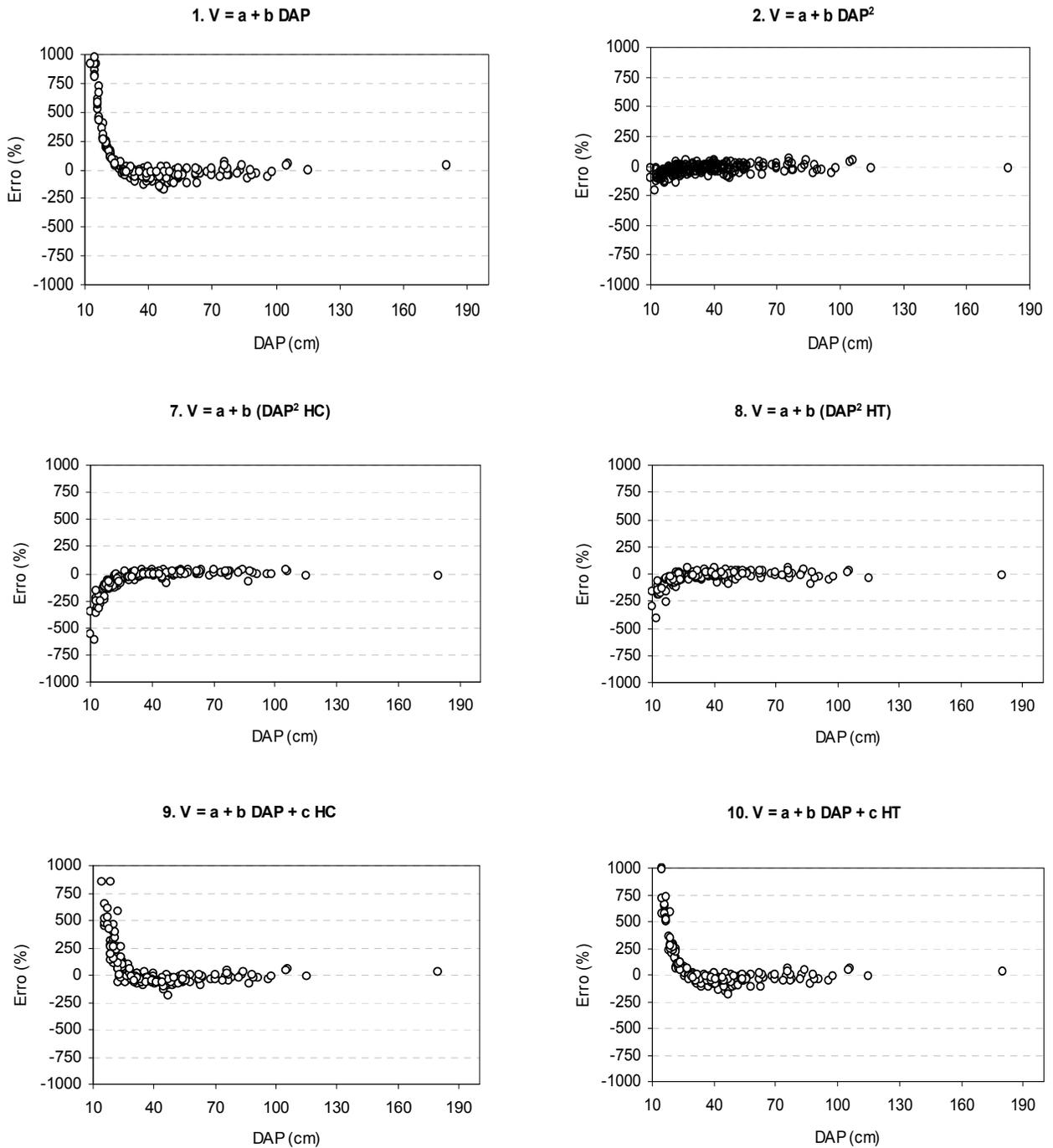


Figura 5. Gráficos de distribuição dos resíduos, em porcentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações lineares

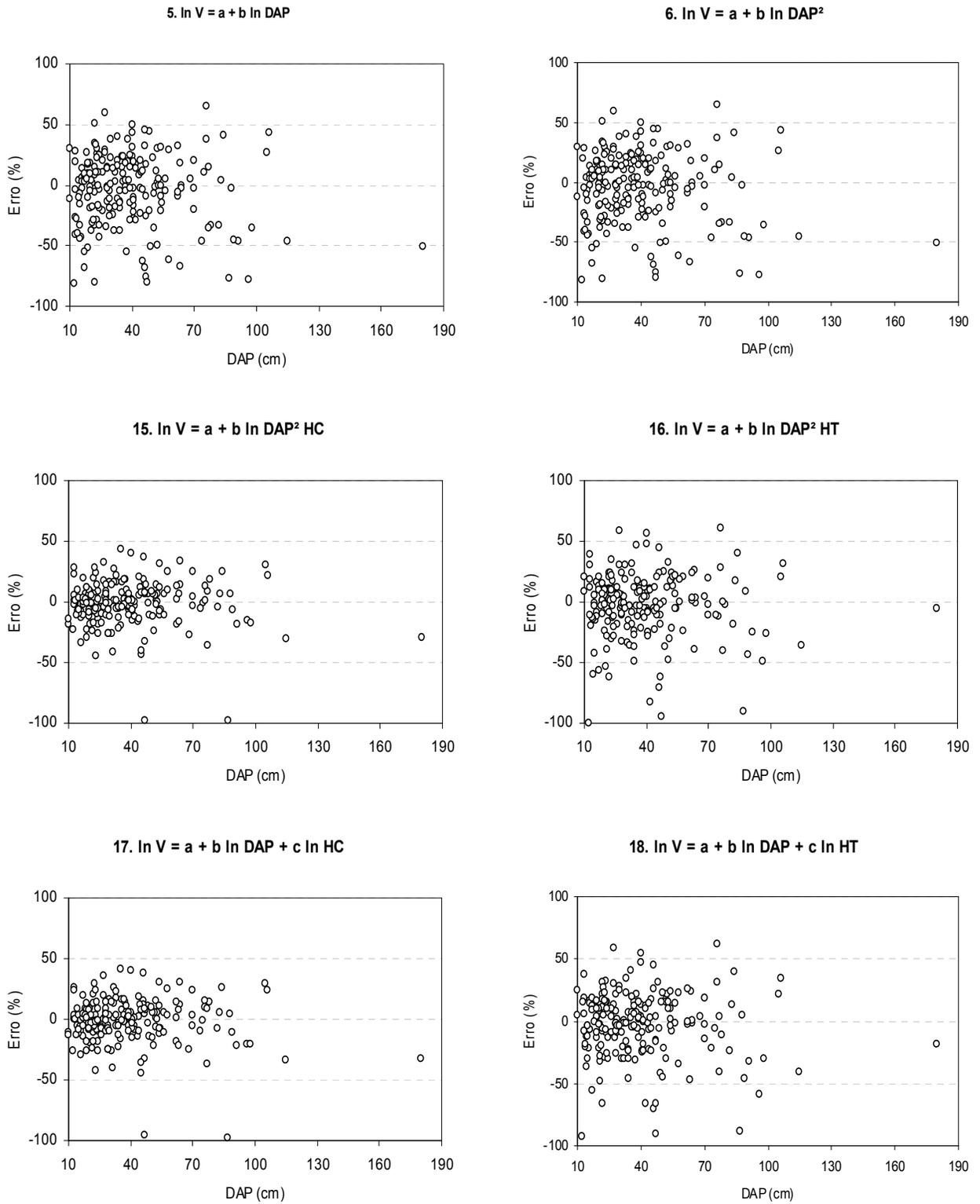


Figura 6. Gráficos de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações logarítmicas.

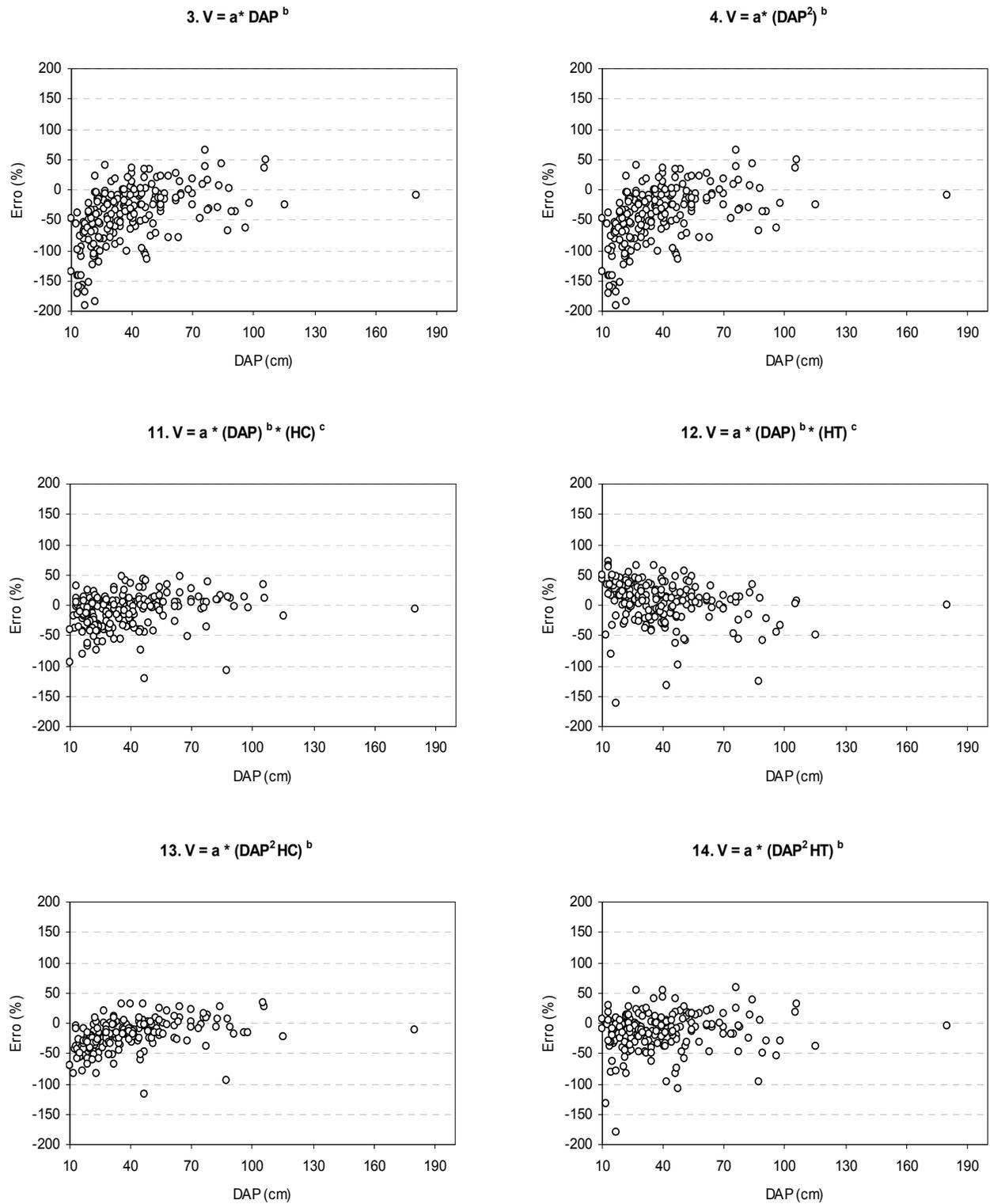


Figura 7. Gráfico de distribuição dos resíduos, em percentagem e em ordem crescente de DAP, para as equações não lineares exponenciais.