

Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF

Comparison of mathematical models to volume, biomass and carbon stock estimation of the woody vegetation of a cerrado *sensu stricto* in Brasília, DF

Alba Valéria Rezende¹, Ailton Teixeira do Vale¹,
Carlos Roberto Sanquetta², Afonso Figueiredo Filho³, Jeanine Maria Felfili¹

Resumo

Este estudo teve como objetivo selecionar modelos para estimativa de volume, biomassa e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto* da Fazenda Água Limpa em Brasília, DF. Dez parcelas de 20x50 m foram selecionadas casualmente em uma área de 63,54 ha, destinada ao estudo. Em cada parcela, o diâmetro tomado a 0,30 m do solo (Db) e altura total foram registrados para cada indivíduo lenhoso com Db ≥ 5 cm. Posteriormente, estes indivíduos foram distribuídos em classes de diâmetro com intervalos de 4 cm. Para o ajuste dos modelos foram selecionados casualmente 25% dos indivíduos de cada classe. Cerca de 174 árvores foram derrubadas e pesadas. Os ajustes dos modelos consideraram troncos e galhos com diâmetro mínimo de 3 cm com casca. A cubagem rigorosa, tanto para o tronco quanto para os galhos, foi feita pelo método de Smalian. Vários modelos matemáticos lineares (aritméticos e logarítmicos) foram testados e a escolha do melhor modelo foi baseada no coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa e na análise gráfica dos resíduos. As melhores equações para volume, biomassa verde, biomassa seca e estoque de carbono foram, $V=0,000109Db^2+0,0000145Db^2Ht$, $BV=0,03047Db^{2,27159}Ht^{0,89748}$, $BS=0,49129+0,02912Db^2Ht$ e $C=0,24564+0,01456Db^2Ht$, respectivamente. Tais equações apresentaram coeficientes de determinação acima de 93% e erros padrões percentuais entre 25,03 e 28,09%. A produtividade média para o cerrado estudado é de $25,10 \pm 2,83 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $20,04 \pm 2,23 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, $9,85 \pm 1,08 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ e $4,93 \pm 0,54 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente, para volume, biomassa lenhosa verde, biomassa lenhosa seca e estoque de carbono.

Palavras-Chave: Cerrado *sensu stricto*, Modelos de volume, Biomassa, Estoque de carbono

Abstract

The objective of this study was to select regression models to estimate volume, biomass and carbon stock for a cerrado *sensu stricto* site at Água Limpa Farm in Brasília, Federal District. A total of ten plots of 20x50 m was randomly selected in a 63.54 ha area. Diameter at 30 cm above ground level (Db) and total height of all woody individuals with Db ≥ 5 cm were measured. After that, these individuals were distributed in diameter classes with an interval of 4 cm. To adjust the models, 25% of the individuals of each class were felled and weighted, resulting a sample of 174 individuals. The real cubic volume of trunk and branches, with bark, was obtained by the Smalian method. Twigs thinner than 3 cm were discarded. Several models (arithmetic and logarithmic) were tested and the selection of the best model was based on the determination coefficient, sampling error and in the graphic analyzes of the residuals. The best equations for volume, fresh woody biomass, dry woody biomass and carbon stock were $V=0,000109Db^2+0,0000145Db^2Ht$, $BV=0,03047Db^{2,27159}Ht^{0,89748}$, $BS=0,49129+0,02912Db^2Ht$ and $C=0,24564+0,01456Db^2Ht$, respectively, which presented determination coefficient above 93%, suggesting a good adjustment of the models and sampling error between 25.03 and 28.09%. The mean productivity found for the cerrado studied was, $25.10 \pm 2.83 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $20.04 \pm 2.23 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, $9.85 \pm 1.08 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ and $4.93 \pm 0.54 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively, for volume, fresh woody biomass, dry woody biomass and carbon stock.

Keywords: Cerrado, Savanna, Volume models, Biomass, Carbon stock

¹Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília – Caixa Postal 04357 – Brasília, DF - 70910-900 - E-mail: albavr@unb.br; ailtontv@unb.br; felfili@unb.br

²Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná - Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico Campus III - Curitiba, PR - 80210-170 - Bolsista do CNPq - E-mail: sanqueta@floresta.ufpr.br

³Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO - PR 153 - Km 07 - Bairro Riozinho - Irati, PR - 84500-000 - E-mail: afonso@irati.unicentro.br

INTRODUÇÃO

A obtenção de estimativas precisas de produtividade em formações vegetais tropicais é um pré-requisito importante no estabelecimento de ações de manejo. Contudo, para a vegetação do Cerrado tais estimativas são escassas, principalmente devido à grande diversidade de espécies, à alta variabilidade existente entre indivíduos de uma mesma espécie, além da grande variação na forma do tronco e copa dos indivíduos. Em geral, a maioria dos estudos tem sido para formações florestais (JORGE, 1982; SILVA, 1989; SOUZA e JESUS, 1991; SCOLFORO *et al.*, 1995 e REIS *et al.*, 1998).

O Cerrado é reconhecido por apresentar uma grande riqueza florística e uma alta diversidade de espécies (FELFILI *et al.*, 1994; FELFILI *et al.*, 1997; MENDONÇA *et al.*, 1998). Além disso, em razão da sua extensão, ou seja, segundo maior bioma brasileiro, representa uma parcela significativa dos ecossistemas terrestres do planeta.

Nos últimos anos, o Cerrado tem sido alvo de grande preocupação. Registros indicam uma acelerada taxa de destruição do Bioma. Cerca de 80% da superfície do Cerrado já foi convertida em pastagens cultivadas, lavouras diversas e áreas urbanas (PRIMACK e RODRIGUES, 2001) e muito pouco se sabe sobre a produtividade lenhosa deste Bioma em termos de volume e biomassa.

Recentemente, com o crescente aumento das concentrações do CO₂ na atmosfera e o seu efeito potencial sobre o clima, muitas pesquisas têm sido direcionadas para estudos visando obter estimativas sobre a contribuição de cada ecossistema na absorção do carbono atmosférico. Sabe-se que as formações vegetais desempenham um importante papel no ciclo global do carbono, mas poucos estudos têm quantificado o estoque de carbono e as taxas de seqüestro de carbono nos diferentes biomas brasileiros. As poucas experiências existentes neste sentido estão restritas à Amazônia (FEARNSIDE e GUIMARÃES, 1995).

No Cerrado, poucos são os estudos sobre estimativa de estoque de carbono (CESAR, 1980; CAVALCANTI, 1978; BATMANIAN, 1983; ROSA, 1990; KAUFFMAN, CUMMINGS e WARD, 1994; REZENDE, 2002) e, portanto, é importante o desenvolvimento de estudos visando a obtenção de estimativas precisas do estoque de carbono nas diferentes fitofisionomias do Cerrado e a inclusão destas estimativas em modelos de manejo florestal.

O objetivo deste trabalho foi estimar o volume, a biomassa e o estoque de carbono para o componente lenhoso aéreo do cerrado *sensu stricto* da Fazenda Água Limpa, em Brasília, DF.

METODOLOGIA

Área de estudo

Este estudo foi realizado em uma área de cerrado *sensu stricto* localizada na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa (FAL), situada a uma altitude de 1100m, entre as coordenadas 15056' e 15°59' Sul e 47°55' e 47°58' WGr, no Distrito Federal. A Fazenda Água Limpa cobre aproximadamente 4000 ha e o solo predominante na área de estudo é o Latossolo Vermelho Amarelo (HARIDASAN, 1990). O clima da região é do tipo Aw de Köppen (NIMER, 1989), com temperatura máxima de 28,5°C e mínima de 12°C e a precipitação média anual é de 1500 mm, com uma pronunciada estação seca de julho a setembro.

A vegetação predominante na FAL é o cerrado *sensu stricto*, mas existem áreas cobertas por diversas fitofisionomias variando desde campo limpo até florestas de galeria. Registros indicam que cerca de 1100 espécies de plantas distribuídas entre 135 famílias botânicas já foram identificadas na área. As famílias mais comuns são Leguminosae, Myrtaceae, Rubiaceae, Vochysiaceae, Gramineae, Compositae. Um número de espécies raras também está presente na composição florística e o endemismo é comum (FELFILI *et al.*, 1994).

Base de dados

Os dados básicos para o desenvolvimento deste estudo foram provenientes de uma área de 63,54 ha de cerrado *sensu stricto* destinada a projetos silviculturais. A área foi dividida em parcelas iguais, de 20x50 m, e em seguida foram selecionadas casualmente 10 parcelas, que tiveram todos os indivíduos lenhosos vivos com diâmetro com casca tomado a 0,30 m do nível do solo (Db) igual ou superior a 5 cm, etiquetados e identificados botanicamente. Para cada indivíduo foram tomadas medidas de Db e altura total (Ht). Após a coleta dos dados provenientes destas parcelas, os indivíduos foram distribuídos em classes de diâmetro com intervalos de 4 cm, conforme critério adotado por Felfili e Silva Jr. (1988) com base no cálculo do intervalo ideal de classes, e também por Vale (2000), e além de outros estudos realizados no cerrado *sensu stricto* no Bioma (FELFILI *et al.*, 2001).

Para o ajuste dos modelos de volume, biomassa lenhosa e estoque de carbono, foram selecionados casualmente 25% dos indivíduos vivos em cada classe diamétrica, procurando sempre incluir dentro de cada classe, pelo menos um indivíduo de cada espécie. Posteriormente, cada indivíduo selecionado de cada classe de diâmetro foi localizado no campo, cortado ao nível do solo com o uso de motosserra e o diâmetro inicial (D_0) tomado neste ponto.

Em seguida, separou-se o tronco dos galhos e mediu-se a altura comercial de cada indivíduo. Considerou-se para ambos, galhos e troncos, um diâmetro mínimo comercial de 3 cm. Galhos e secções do tronco com Db menor que 3 cm foram eliminados.

Para a obtenção do volume real de cada indivíduo, a cubagem rigorosa do tronco e dos galhos foi realizada pela aplicação sucessiva da expressão de Smalian (HUSCH *et al.*, 1972), em secções de comprimentos variáveis ao longo do tronco, tendo em vista que as espécies arbóreas do cerrado possuem tronco e galhos tortuosos.

Para o cálculo da biomassa de cada indivíduo, tronco e galhos foram pesados separadamente utilizando-se balança com capacidade máxima de 150 kg. Ambas as massas foram obtidas com casca. O peso seco de cada indivíduo lenhoso foi determinado conforme Vale (2000) e a quantidade de carbono foi obtida usando a proporção de carbono em madeiras que, para a maioria das folhosas, equivale a 50%, base seca (BROWNING, 1963; BODIG e JAYNE, 1963).

Análise dos dados

Florística e estrutura da vegetação lenhosa arbórea-arbustiva

A análise florística da vegetação foi obtida a partir dos índices que expressam a estrutura horizontal da vegetação (KENT e COKER, 1992), ou seja: densidade, dominância, frequência e índice de valor de cobertura.

Estimativa do volume, biomassa lenhosa e estoque de carbono

Para estimar o volume em metros cúbicos, a biomassa lenhosa e o estoque de carbono em kg de cada indivíduo do cerrado *sensu stricto* foram testados vários modelos matemáticos, lineares e não lineares, a partir dos dados de cubagem rigorosa e de biomassa.

As variáveis dendrométricas independentes destes modelos foram: Db (cm) e Ht (m), além de suas combinações. Definidas as variáveis independentes, foram testados os seguintes

modelos, comumente utilizados para estimativa de volumes e peso de indivíduos lenhosos, ou seja:

(Modelo da Variável Combinada de Spurr)

$$1) Y = \beta_0 + \beta_1(Db^2Ht) + \varepsilon$$

(Modelo de Naslund)

$$2) Y = \beta_1 Db^2 + \beta_2 Db^2 Ht + \beta_3 Db Ht^2 + \beta_4 Ht^2 + \varepsilon$$

(Modelo de Ogaya)

$$3) Y = Db^2(\beta_0 + \beta_1 Ht) + \varepsilon$$

(Modelo do fator de forma constante)

$$4) Y = \beta_1 Db^2 Ht + \varepsilon$$

(Modelo de Schumacher e Hall)

$$5) Y = \beta_0 Db^{\beta_1} Ht^{\beta_2} \varepsilon$$

(Modelo Logarítmico de Spurr)

$$6) Y = \beta_0 (Db^2 Ht)^{\beta_1} \varepsilon$$

sendo:

Y = volume real (m^3) ou biomassa verde (kg) ou biomassa seca (kg) ou estoque de carbono (kg);
 Db = diâmetro do fuste tomado a 0,30 m do solo (cm);

Ht = altura total (m);

β_0, \dots, β_3 = parâmetros dos modelos;

Ln = logaritmo neperiano;

ε = erro aleatório.

Além destes modelos, foi utilizado também o procedimento "Stepwise" de seleção de variáveis significativas para geração de modelos (DRAPPER e SMITH, 1981). Assim, foi gerado um modelo para cada variável analisada (volume, biomassa verde, biomassa seca e estoque de carbono) a partir do procedimento "Stepwise", sendo o mesmo, definido como modelo 7.

Os critérios utilizados para a escolha do melhor modelo para cada variável dependente analisada, segundo Drapper e Smith (1981), foram: a) exame do quadro de análise de variância; b) análise das medidas de precisão: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajustado}$), e erro padrão da estimativa, expresso como uma percentagem da média aritmética da variável dependente ($Syx\%$), sendo, neste caso, interpretado de forma análoga ao coeficiente de variação; c) distribuição gráfica dos valores residuais.

Os modelos 5 e 6, não lineares, foram linearizados utilizando a transformação logarítmica, e as medidas de precisão das equações originais destes modelos foram recalculadas para as suas unidades originais, para que pudessem ser comparadas com aquelas obtidas pelas equações lineares. Para isto foi utilizado o fator de correção para a discrepância logarítmica, no cálculo dessas novas medidas de precisão:

$$f = e^{(QMR/2)},$$

sendo:

f = fator de correção para a discrepância logarítmica;

e = exponencial;

QMR = quadrado médio do resíduo da equação logarítmica.

Calculado o fator de correção para a discrepância logarítmica, foi obtido o valor estimado corrigido da variável dependente analisada. De posse destes novos valores, foram recalculadas a soma de quadrados dos resíduos (SQResíduo_{recalculada}) e a soma de quadrados da regressão (SQRegressão_{recalculada}), para obtenção dos valores corrigidos de R² e Syx% das equações, dados por:

$$R^2 = \frac{SQRegressão_{recalculada}}{SQTotal}$$
$$Syx\% = \frac{\sqrt{\frac{SQResíduo_{recalculada}}{n - k - 1}}}{\bar{Y}} * 100$$

sendo:

SQTotal = Soma de quadrados total;

n = número de observações;

K = número de variáveis independentes;

\bar{Y} = média da variável dependente.

Para verificação da precisão dos modelos selecionados foi aplicado o teste t para dados pareados (ZAR, 1999), tradicionalmente utilizado quando se deseja examinar se uma nova técnica de predição é igual ou pode substituir uma já existente. Os modelos selecionados foram aplicados para estimar a produção volumétrica, de biomassa e de carbono para o cerrado *sensu stricto*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estrutura da vegetação

Na área amostrada foram encontradas 49 espécies pertencentes a 25 famílias. O diâmetro dos indivíduos amostrados variou de 5 a 55 cm, mas cerca de 80% dos indivíduos atingiram no máximo 11,5 cm. A altura variou de 0,7 a 11,4 m com uma média de 3,5 m. Estes resultados condizem com a estrutura de tamanho encontrada para a fitofisionomia cerrado *sensu stricto* (FELFILI e SILVA JR., 1988, FELFILI *et al.*, 2000).

A Tabela 1 apresenta o resultado do levantamento fitossociológico realizado na área.

A densidade total da área amostrada para os indivíduos vivos foi de 681 ind.ha⁻¹, com área basal de 6,23 m².ha⁻¹ (Tabela 1). Quando os indivíduos mortos em pé foram incluídos, a den-

sidade total foi de 841 ind.ha⁻¹, com área basal de 7,36 m².ha⁻¹.

Estudos fitossociológicos padronizados no cerrado *sensu stricto* (FELFILI *et al.*, 1994, 1997, 2000, 2001) têm mostrado que a densidade varia de 664 a 1396 ind.ha⁻¹ e a área basal varia de 5,8 a 11,3 m².ha⁻¹. Estes valores representam apenas cerca de 1/3 daqueles encontrados para formações florestais brasileiras (FELFILI, 1995). Portanto, os valores de densidade e área basal encontrados neste estudo estão dentro da faixa encontrada em trabalhos com metodologia similar para o cerrado *sensu stricto*, demonstrando que esta área é bastante representativa do cerrado *sensu stricto* do Brasil Central quanto a sua estrutura.

O maior número de indivíduos está concentrado na menor classe de diâmetro (Tabela 2), o que é uma característica da vegetação do Cerrado (Felfili *et al.*, 1994 e Felfili *et al.*, 2000) e da maioria das formações florestais tropicais, ou seja, grande parte da biomassa dos troncos das espécies lenhosas de cerrado *sensu stricto* está concentrada em plantas de pequeno porte.

A Tabela 3 apresenta, resumidamente, as estatísticas descritivas relativas às características dendrométricas, à biomassa lenhosa e ao estoque de carbono das árvores-amostra. Como era de se esperar, nota-se uma considerável variação nos valores encontrados para todas as variáveis, o que é justificável por se tratar de uma vegetação nativa. Nota-se, ainda, que o volume e o peso verde dos galhos representam, em média, aproximadamente, 60% do volume e peso total da árvore.

Ajuste dos modelos volumétricos, de biomassa lenhosa e estoque de carbono

Antes do ajuste dos modelos, foram construídos os gráficos de dispersão entre cada variável de interesse e as variáveis independentes Db e H, o que possibilitou verificar a presença de "outliers" entre os dados, que é uma característica comum em relações que envolvem variáveis biológicas.

A presença desses "outliers" foi também possível de ser constatada a partir da distribuição gráfica dos resíduos, resultante do ajuste de cada modelo proposto. Pode-se considerar que esses "outliers" sejam decorrentes, provavelmente, ou de erros sistemáticos ocorridos durante a coleta dos dados ou da grande diversidade de formas de fustes e copas dos indivíduos arbóreos do Cerrado. Esta diversidade de formas é uma característica típica da vegetação e ocorre tanto entre espécies como dentro de uma mesma espécie. (Tabela 3).

Tabela 1. Fitossociologia da comunidade lenhosa (Db ≥ 5cm) do cerrado sensu stricto amostrado na Fazenda Água Limpa, DF. (Phytosociology of the woody community (Db ≥ 5cm) of a cerrado sensu stricto sampled at the Fazenda Água Limpa, DF).

Espécie	DA (N/ha)	DR (%)	DoA (m ² /ha)	DoR (%)	IVC (%)
<i>Ouratea hexasperma</i>	114,00	16,74	0,61163	9,82	26,56
<i>Dalbergia miscolobium</i>	84,00	12,33	0,65595	10,53	22,86
<i>Sclerobium paniculatum</i>	46,00	6,75	1,02478	16,45	23,20
<i>Qualea grandiflora</i>	35,00	5,14	0,43757	7,03	12,17
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	20,00	2,94	0,53662	8,62	11,56
<i>Qualea parviflora</i>	35,00	5,14	0,31567	5,07	10,21
<i>Caryocar brasiliense</i>	29,00	4,26	0,39816	6,39	10,65
<i>Miconia pohliana</i>	35,00	5,14	0,19710	3,16	8,30
<i>Palicourea rigida</i>	32,00	4,70	0,11834	1,90	6,60
<i>Pterodon pubescens</i>	15,00	2,20	0,36732	5,90	8,10
<i>Schefflera macrocarpa</i>	25,00	3,67	0,17918	2,88	6,55
<i>Qualea multiflora</i>	23,00	3,38	0,10823	1,74	5,12
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	13,00	1,91	0,34845	5,59	7,50
<i>Kielmeyera coriacea</i>	21,00	3,08	0,05559	0,89	3,97
<i>Eremanthus glomerulatus</i>	16,00	2,35	0,04354	0,70	3,05
<i>Byrsonima crassa</i>	11,00	1,62	0,03619	0,58	2,20
<i>Eriotheca pubescens</i>	10,00	1,47	0,07405	1,19	2,66
<i>Guapira noxia</i>	10,00	1,47	0,04473	0,72	2,19
<i>Pouteria ramiflora</i>	8,00	1,17	0,10072	1,62	2,79
<i>Styrax ferrugineus</i>	8,00	1,17	0,06274	1,01	2,18
<i>Aspidosperma tomentosum</i>	11,00	1,62	0,04323	0,69	2,31
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	5,00	0,73	0,05441	0,87	1,60
<i>Kielmeyera speciosa</i>	12,00	1,76	0,04207	0,68	2,44
<i>Miconia ferruginata</i>	8,00	1,17	0,05461	0,88	2,05
<i>Vochysia elliptica</i>	6,00	0,88	0,03182	0,51	1,39
<i>Connarus suberosum</i>	7,00	1,03	0,01603	0,26	1,29
<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	5,00	0,73	0,03325	0,53	1,26
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	3,00	0,44	0,07821	1,26	1,70
<i>Byrsonima verbascifolia</i>	4,00	0,59	0,01494	0,24	0,83
<i>Erythroxylum tortuosum</i>	3,00	0,44	0,01111	0,18	0,62
<i>Rapanea guianensis</i>	3,00	0,44	0,01087	0,17	0,61
<i>Piptocarpha rotundifolia</i>	3,00	0,44	0,01136	0,18	0,62
<i>Byrsonima coccolobifolia</i>	2,00	0,29	0,01041	0,17	0,46
<i>Eriotheca gracilipes</i>	2,00	0,29	0,01021	0,16	0,45
<i>Rourea induta</i>	2,00	0,29	0,00905	0,15	0,44
<i>Erythroxylum suberosum</i>	2,00	0,29	0,00536	0,09	0,38
<i>Lafoensia pacari</i>	1,00	0,15	0,01431	0,23	0,38
<i>Strychnos pseudoquina</i>	1,00	0,15	0,01389	0,22	0,37
<i>Acosmium dasycarpon</i>	1,00	0,15	0,00785	0,13	0,28
<i>Dimorphandra mollis</i>	1,00	0,15	0,00694	0,11	0,26
<i>Tabebuia serratifolia</i>	1,00	0,15	0,00636	0,10	0,25
<i>Enterolobium ellipticum</i>	1,00	0,15	0,00454	0,07	0,22
<i>Roupala montana</i>	1,00	0,15	0,00442	0,07	0,22
<i>Davilla elliptica</i>	1,00	0,15	0,00442	0,07	0,22
<i>Tabebuia ochracea</i>	1,00	0,15	0,00322	0,05	0,20
<i>Vochysia rufa</i>	1,00	0,15	0,00264	0,04	0,19
<i>Psidium warmingianum</i>	1,00	0,15	0,00255	0,04	0,19
<i>Symplocos rhamnifolia</i>	1,00	0,15	0,00221	0,04	0,19
<i>Erythroxylum deciduum</i>	1,00	0,15	0,00196	0,03	0,18
Total	681,00	100,00	6,22876	100,00	200,00

DA = densidade absoluta; DR = Densidade relativa; DoA = Dominância absoluta; DoR Dominância Relativa; IVC = Índice de Valor de Cobertura; N = Número de indivíduos.

Tabela 2. Frequência absoluta e relativa, por classe de diâmetro, dos indivíduos encontrados na área de cerrado *sensu stricto*. (Absolute and Relative Frequency, per diameter class, of the woody community of a cerrado *sensu stricto* at Fazenda Água Limpa, DF)

Classes de Db (cm)	Frequência Total		Frequência selecionada (25% Freq. Total Abs)
	Absoluta	Relativa (%)	
5,0 – 8,9	369	54,18	93
9,0 – 12,9	187	27,46	47
13,0 – 16,9	74	10,87	19
17,0 – 20,9	25	3,67	7
21,0 – 24,9	17	2,50	5
25,0 – 28,9	5	0,73	2
29,0 – 32,9	3	0,44	1
....	-
53,0 – 56,9	1	0,15	-
Total	681	100,00	174

Tabela 3. Valores mínimos e máximos, média e desvio, relativos às características dendrométricas, de biomassa lenhosa e de estoque de carbono das árvores-amostra selecionadas para o ajuste dos modelos. (Minimum, maximum, mean and standard deviation, related to dendrometric traits of the woody biomass and carbon stock of the sample-trees selected to adjust the regression models)

Variáveis	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio Padrão
Db (cm)	5,00	32,30	8,50	4,85
Ht (m)	1,00	11,10	3,07	1,67
Hf (m)	0,3	6,39	1,71	1,06
Hc (m)	0,03	8,16	1,18	1,44
VT (m ³)	0,001056	0,651626	0,016886	0,087735
VF (m ³)	0,001056	0,181126	0,010920	0,026905
VG (m ³)	0,0	0,470500	0,004220	0,064347
PT (kg)	0,30	171,80	7,55	23,66
PG (kg)	0,0	375,40	2,80	50,33
PV (kg)	0,40	547,20	11,30	71,09
PS (kg)	0,32	276,70	5,45	38,69
Estoque de carbono (kg)	0,16	138,35	2,72	19,35

Db - diâmetro tomado a 0,30 do nível do solo; Ht - altura total; Hf - altura do fuste; Hc - altura da copa; VT - volume total; VF - volume do fuste; VG - volume de galhos; PT - peso do tronco; PG - peso de galhos; PV - peso total (tronco e galhos); PS - peso seco (tronco e galhos).

Mas, analisando os “outliers” separadamente, foi possível verificar que estes correspondiam aos indivíduos cujo volume ou peso encontrava-se muito distante da média dos padrões encontrados para cada classe de diâmetro a que pertenciam. Após o ajuste dos modelos, verificou-se que para estes indivíduos, o valor residual absoluto chegava a ser igual a cinco vezes o valor real da variável estudada e isto, conseqüentemente, proporcionava aos modelos baixos valores de R² e altos valores de erro padrão da estimativa.

Na tentativa de melhorar as estimativas dos modelos, realizou-se a divisão dos dados em dois grupos: indivíduos com Db variando de 5 a 12,9 cm (grupo 1), que engloba 80,46% dos dados e indivíduos com Db igual ou superior a 13 cm. As amplitudes foram definidas a partir da observação da distribuição residual obtida pelo ajuste dos modelos, utilizando todo o conjunto de dados. Para cada grupo foram ajustados os seis modelos propostos, além do ajuste do sétimo modelo utilizando-se do procedimento “Stepwise”, entretanto, nenhuma melhoria foi

observada quanto aos resultados. Assim, decidiu-se eliminar do conjunto de dados os “outliers”, e em seguida, procedeu-se o novo ajuste.

Os modelos provenientes do procedimento “Stepwise” para as diferentes variáveis foram:

$$\text{Volume: } V = \beta_1 Db^2 + \beta_2 Db^2 Ht + \varepsilon_i$$

$$\text{Biomassa lenhosa verde: } V = \beta_1 Db^2 + \beta_2 Db^3 + \beta_3 Ht^2 + \beta_4 Db Ht + \varepsilon$$

$$\text{Biomassa lenhosa seca e estoque de carbono: } Y = \beta_1 (Db^2 Ht) + \varepsilon$$

Todos os modelos testados para estimar as variáveis volume, biomassa lenhosa verde, biomassa lenhosa seca e estoque de carbono apresentaram valores de F significativos (F<0,01).

Para biomassa lenhosa seca e estoque de carbono, a utilização da técnica Stepwise para a seleção de variáveis resultou em um modelo (modelo 7) idêntico ao modelo 4 (Fator de forma constante), proposto na metodologia (Tabela 4).

Como neste estudo a variável estoque de carbono foi considerada igual a 50% do peso seco de cada indivíduo, as medidas de precisão de cada equação ajustada foram iguais às obtidas

para o peso seco e, conseqüentemente, o gráfico de resíduos também (Figuras 1, 2 e 3).

As equações ajustadas para volume (Tabela 4) apresentaram medidas de precisão semelhantes. O coeficiente de determinação variou de 94,8% a 98,0% e erro percentual de 25,03% a 30,24%.

As equações 2 e 7 apresentaram as melhores medidas de precisão quando foram comparadas às outras equações. Entretanto, observa-se na Figura 1b, referente à equação 2, tendências a superestimação do volume das árvores de menor diâmetro. No caso da equação 7 (Figura 1g), os resíduos estão mais bem distribuídos. As equações não lineares 5 e 6 (Figuras 1e e 1f) também apresentaram esta tendência. A equação 4, embora tenha apresentado distribuição de resíduos mais homogênea (Figura 1d), apresentou um

erro percentual maior que o encontrado pela equação 7. Desta forma, baseado nas análises comparativas, selecionou-se a equação 7, obtida pelo procedimento "Stepwise", como sendo aquela que melhor estimou o volume das árvores individuais do Cerrado.

Para a variável biomassa lenhosa verde (Tabela 4), tal como para a variável volume, as sete equações ajustadas apresentaram comportamentos semelhantes, com valores de R² variando de 95,82% a 99,17% e de Syx% variando de 26,34% a 33,76%. A equação 3 foi a que apresentou menor R² e maior Syx%, quando comparada com as demais. Verifica-se ainda, que essa equação apresenta tendências à superestimação da biomassa verde, tanto nas árvores de menor diâmetro quanto naquelas pertencentes às classes de diâmetro intermediárias (Figura 2c).

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros das equações ajustadas para volume, biomassa lenhosa verde e seca e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto*, incluindo as respectivas medidas de precisão. (Regression parameters estimated for the adjusted equations for volume, fresh and dry woody biomass and carbon stock for the cerrado *sensu stricto*, and their measures of precision)

Modelo	Coeficientes					f	R ² (%)	Syx (%)
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4			
Modelos Volumétricos								
1	0,0041	5,94.10 ⁻⁵	-	-	-	-	95,95	29,57
2	-	3,38.10 ⁻⁵	0,0001	3,23.10 ⁻⁵	-2,3.10 ⁻⁴	-	98,00	25,06
3	6,05.10 ⁻⁵	5,46.10 ⁻⁵	-	-	-	-	96,60	27,20*
4	-	6,22.10 ⁻⁵	-	-	-	-	96,69	26,16
5	6,80.10 ⁻⁵	2,1859	0,6979	-	-	1,043	(94,79)	29,86*
6	9,29.10 ⁻⁵	0,9548	-	-	-	1,047	(94,78)	30,24*
7	-	1,09.10 ⁻⁴	4,51.10 ⁻⁴	-	-	-	98,01	25,0
Modelos de Biomassa Lenhosa Verde								
1	-1,0987	0,0561	-	-	-	-	96,72	29,81
2	-	0,0911	-0,0371	-0,1084	0,3245	-	98,03	26,98
3	-0,0005	0,0509	-	-	-	-	95,82	33,76*
4	-	0,0551	-	-	-	-	97,54	30,14
5	0,0305	2,2716	0,8975	-	-	1,044	(99,17)	28,09*
6	0,0363	1,0545	-	-	-	1,045	(96,56)	29,60*
7	-	-0,2279	0,0188	-	-0,49055	-	98,12	26,30
Modelos de Biomassa Lenhosa Seca								
1	-0,4913	0,0291	-	-	-	-	98,28	25,79
2	-	0,0298	0,0029	-6,17.10 ⁻⁵	-0,0750	-	98,64	25,66
3	-0,0108	0,0297	-	-	-	-	98,12	26,98*
4	-	0,0288	-	-	-	-	98,60	26,01
5	0,0129	2,3045	0,9932	-	-	1,055	(93,39)	40,69*
6	0,0145	1,0974	-	-	-	1,056	(94,02)	38,58*
7	-	0,0288	-	-	-	-	98,60	26,00
Modelos de Estoque de Carbono								
1	-0,2456	0,0145	-	-	-	-	98,28	25,79
2	-	0,0149	0,0014	3,08.10 ⁻⁵	-0,0375	-	98,64	25,66
3	-0,0054	0,0148	-	-	-	-	98,12	26,98
4	-	0,0144	-	-	-	-	98,60	26,01
5	0,0064	2,3045	0,9932	-	-	1,055	(93,39)	40,69*
6	0,0072	1,0974	-	-	-	1,056	(94,02)	38,58*
7	-	0,0144	-	-	-	-	98,60	26,01

Valor de Syx% com asterisco refere-se ao valor de Syx recalculado; Valor de R²% entre parêntesis refere-se ao valor de R²% recalculado; f = fator de correção para a discrepância logarítmica.

Essa mesma tendência pode ser observada nas equações 2 e 4 (Figuras 2b e 2d). As equações 1, 5, 6 e 7 apresentaram distribuição residual mais homogênea, com ligeira tendência à superestimação da biomassa lenhosa nas árvores das classes intermediárias (Figuras 2a, 2e, 2f e 2g). Com base nas análises efetuadas, optou-se pela equação de Schumacher e Hall (equação 5), para estimar a biomassa lenhosa verde do cerrado *sensu stricto* estudado.

Quanto às variáveis biomassa lenhosa seca e estoque de carbono (Tabela 4), as equações não lineares (5 e 6) foram as que apresentaram menores coeficientes de determinação e maiores erros percentuais, com tendências a superesti-

mar o valor dessas variáveis, tanto para as árvores de menor diâmetro quanto para aquelas de maior diâmetro (Figuras 3e e 3f), sendo portanto, indesejáveis para a estimativa da biomassa lenhosa seca e do estoque de carbono das árvores individuais. As equações 1, 2, 3 e 4 (igual a 7), apresentaram medidas de precisão muito semelhantes.

Os valores de R^2 variaram de 98,12% a 98,64% e os valores de Syx variaram de 25,66% a 26,98%. O padrão de distribuição dos resíduos das equações 2, 3 e 4, mostra tendências de superestimação do valor das duas variáveis analisadas, para as árvores de menor diâmetro (Figuras 3b, 3c e 3d).

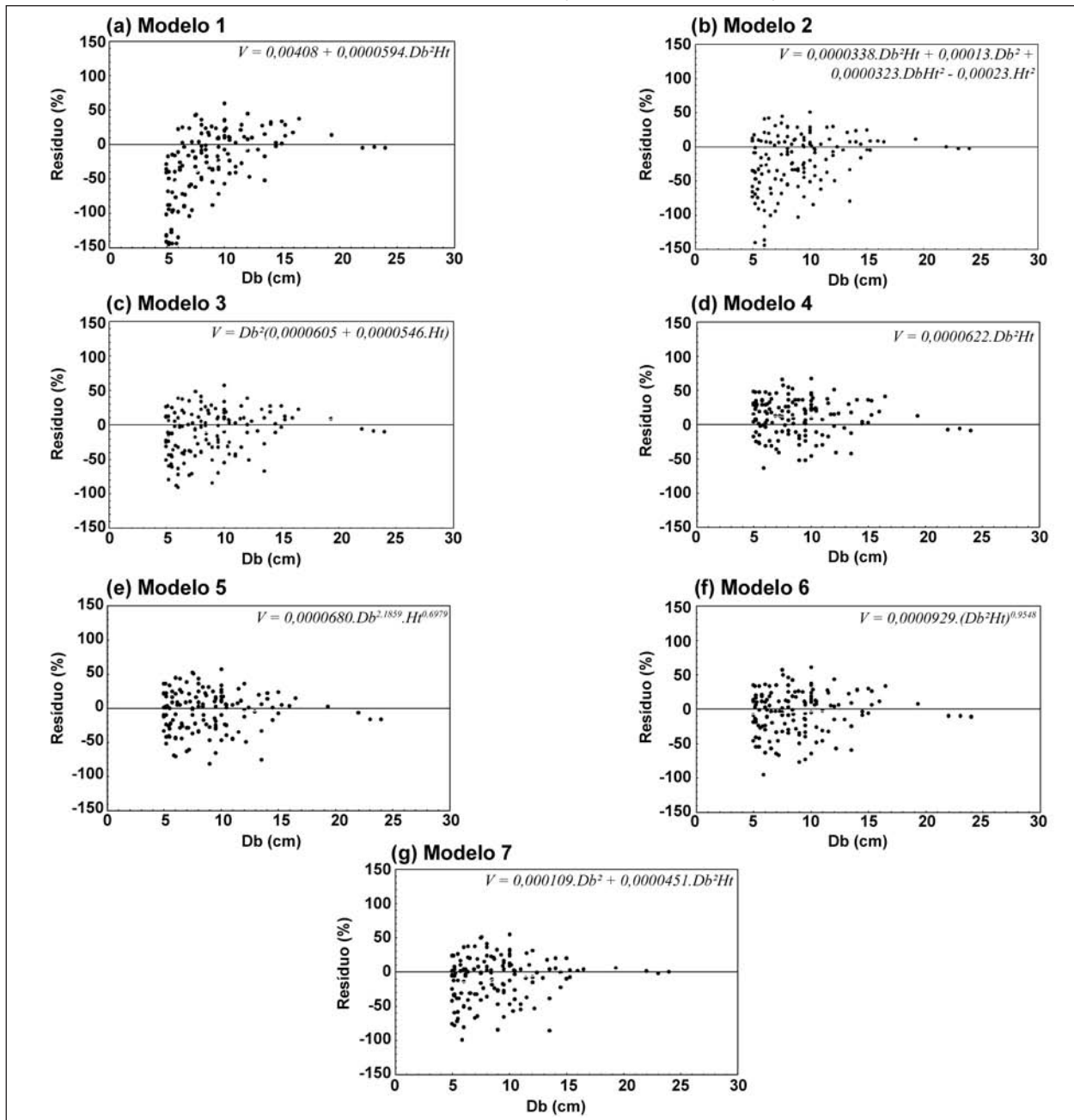


Figura 1. Resíduos percentuais em relação ao Db, para as estimativas de volume (V) de árvores do cerrado *sensu stricto*, obtidas com as equações referentes aos modelos lineares (a, b, c, d e g) e não lineares (e e f). (Percentage of Residuals in relation Db for volume estimates for cerrado trees, obtained with equations by using linear (a, b, c, d and g) and non linear (e and f) models)

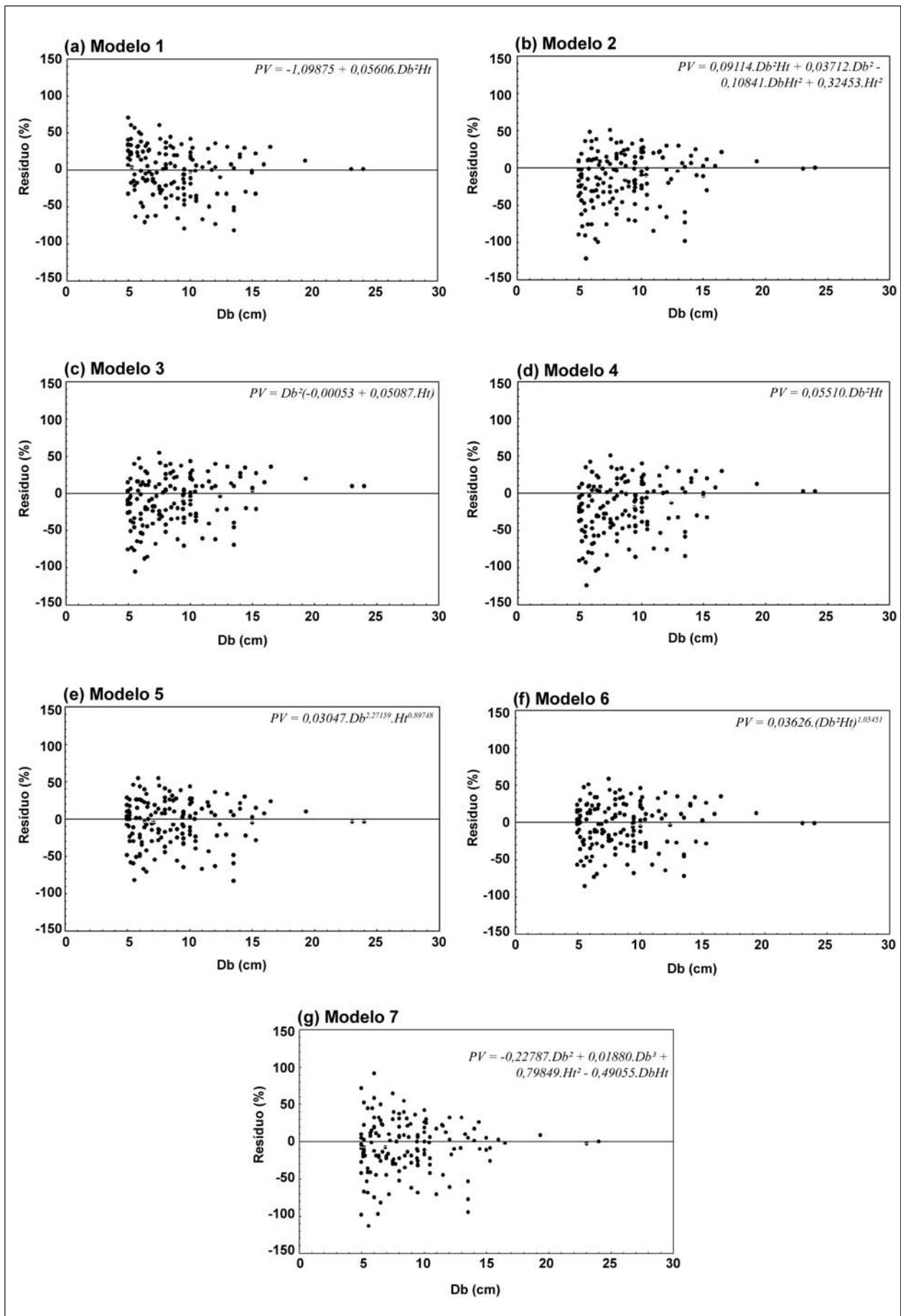


Figura 2. Resíduos percentuais em relação ao Db, para as estimativas de biomassa lenhosa verde (PV) de árvores do cerrado, obtidas com as equações referentes aos modelos lineares (a, b, c, d e g) e não lineares (e e f). (Percentage of Residuals in relation Db for fresh woody biomass estimates for cerrado trees, obtained with equations by using linear (a, b, c, d and g) and non linear (e and f) models)

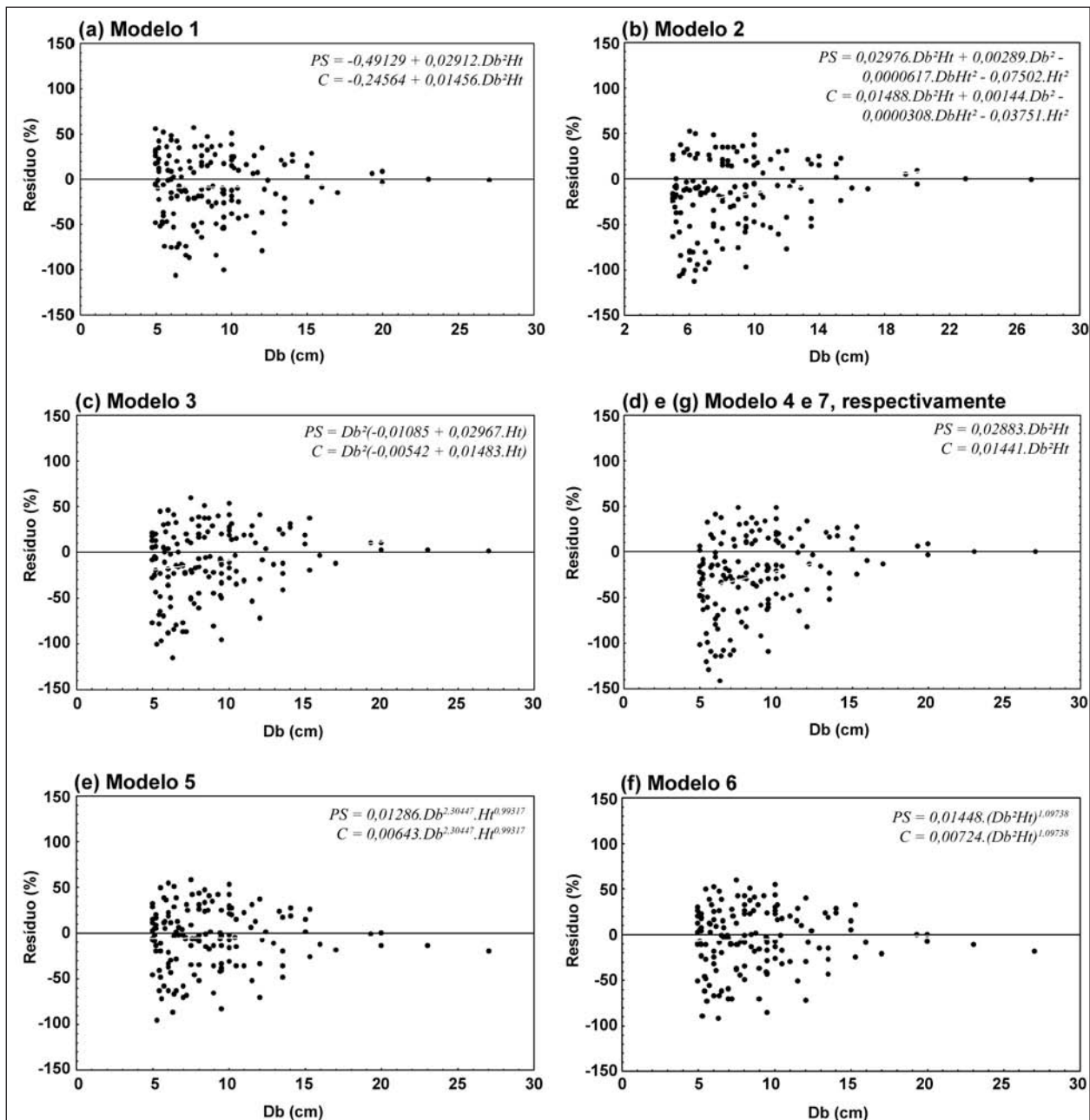


Figura 3. Resíduos percentuais em relação ao Db, para as estimativas de biomassa lenhosa seca (PS) e estoque de carbono (C) de árvores do cerrado, obtidas com as equações referentes aos modelos lineares (a, b, c, d e g) e não lineares (e e f). (Percentage of Residuals in relation Db for dry woody biomass and carbon stock estimates for cerrado trees, obtained with equations by using linear (a, b, c, d and g) and non linear (e and f) models).

A equação 1, ajustada para as duas variáveis, foi a que apresentou melhor distribuição dos resíduos (Figura 3a), com pequena tendência à superestimação nas árvores de menor diâmetro sendo, portanto, selecionada para estimar os valores dessas variáveis. Os erros encontrados nas equações selecionadas para estimar os valores das variáveis de interesse estão na ordem de 25 a 40,7%. Contudo, considera-se que estes erros refletem a variabilidade real na natureza. Essa variabilidade tende a aumentar, principalmente, quando muitas árvores de maior diâmetro são incluídas. Uma intensidade de amostragem maior poderia melhorar a relação da regressão, mas devido à variabilidade inerente nas grandes árvores, provavelmente seria praticamente im-

possível reduzir este nível de erro, mesmo com uma amostra extremamente grande.

Após a seleção das equações para cada variável de interesse, estas foram submetidas a um teste de validação, com o objetivo de avaliar suas eficiências em estimar o valor real de cada variável. O teste t para dados pareados foi utilizado para testar a validade dos modelos e, para isso, foram utilizados 50 indivíduos arbóreos pertencentes ao mesmo intervalo de classe diamétrica que originou as equações. Observa-se na Tabela 5, que o valor de t para as quatro equações selecionadas, não foi significativo, indicando, portanto, a eficiência de cada equação, ou seja, os valores estimados obtidos a partir das equações ajustadas não diferem significativamente dos valores reais de cada variável.

Tabela 5. Teste de significância das equações selecionadas para estimativa de volume, biomassa lenhosa verde, biomassa lenhosa seca e estoque de carbono de indivíduos arbóreos do cerrado *sensu stricto*. (Significance test of the selected equations to estimate volume, fresh and dry biomass and carbon stock for woody individuals of the cerrado *sensu stricto*)

Variável	Número da equação selecionada	Erro padrão das diferenças médias	Valor de "t" calculado
Volume	5	0,0628	0,44781 ^{ns}
Biomassa Lenhosa Verde	6	33,6862	0,16481 ^{ns}
Biomassa Lenhosa Seca	1	35,4703	0,22631 ^{ns}
Estoque de carbono	1	17,7351	0,22631 ^{ns}

ns = não significativo ao nível de 1% de probabilidade

Estimativa do volume, biomassa lenhosa e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto* da FAL

A partir das equações selecionadas foram estimados os valores, por hectare, das variáveis volume, biomassa lenhosa verde e seca e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto* da FAL. Para isto, tomou-se como base os dados provenientes de um inventário contínuo que vem sendo realizado a cada três anos, desde 1985, em 21 parcelas distribuídas aleatoriamente, no cerrado *sensu stricto* da Fazenda Água Limpa (FELFILI *et al.*, 2000).

Verificou-se que, a produtividade média do cerrado *sensu stricto* da FAL em termos de área basal é de $6,64 \pm 0,84 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Com relação às variáveis volume, biomassa verde, biomassa seca e estoque de carbono, a produtividade média é de, respectivamente, $25,10 \pm 2,83 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $20,05 \pm 2,23 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, $9,85 \pm 1,08 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ e $4,93 \pm 0,54 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$. Em relação à biomassa lenhosa, Silva (1990), estudando outra área de cerrado *sensu stricto* localizada também na Fazenda Água Limpa, encontrou um total de $21,7 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, incluindo tronco, ramos, folhas e frutos de todas as espécies lenhosas.

CONCLUSÕES

Para o cerrado *sensu stricto* estudado, conclui-se:

- Grande parte do volume, biomassa e estoque de carbono contido na vegetação lenhosa, refere-se a indivíduos com troncos de até 11,5 cm de diâmetro;
- Mesmo apresentando erros em torno de 30%, considera-se que as equações selecionadas neste estudo são satisfatórias tendo em vista a variabilidade natural existente na estrutura da vegetação e na forma dos troncos das espécies lenhosas do cerrado *sensu stricto*;
- Com base nas equações ajustadas, a produtividade média do cerrado *sensu stricto* estudado em volume, biomassa lenhosa verde, biomassa lenhosa seca e estoque carbono é de, respectivamente, $25,10 \pm 2,83 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $20,04 \pm 2,23 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, $9,85 \pm 1,08 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ e $4,93 \pm 0,54 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), à FINATEC e ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), em especial ao Programa PELD, pelo apoio financeiro e aos funcionários Edson Cardoso e Newton Rodrigues, pela ajuda no trabalho de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATMANIAN, G.J. Efeitos do fogo sobre a produção primária e a acumulação de nutrientes no estrato rasteiro de um cerrado. 1983. 78p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 1983.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. Florida: Krieger Publishing Company, 1993. 735p.
- BROWNING, B.L. *The chemistry of wood*. London: Interscience Publishers, 1963. 699p.
- CAVALCANTI, L.H. Efeitos das cinzas resultantes da queima sobre a produtividade do estrato herbáceo-subarbustivo do cerrado de Emas, SP. 1978. 219p. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.
- CESAR, H.L. Efeitos da queima e corte sobre a vegetação de um campo sujo na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. 1980. 59p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1980.
- DRAPPER, N.R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley, 1981. 725p.
- FEARNSIDE, P.M.; GUIMARÃES, W.M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.80, p.35-46, 1996.
- FELFILI, J.M. Diversity, structure and dynamics of a gallery forest in central Brazil. *Vegetatio*, Berlin, v.117, p.1-15, 1995.

- FELFILI, J.M.; SILVA JR., M.C. Distribuição de diâmetros numa faixa de Cerrado na Fazenda Água Limpa (FAL) em Brasília, DF. *Acta Botânica Brasileira*, São Paulo, v.2, n.1, p.85-104, 1988.
- FELFILI, J.M.; FILGUEIRAS, T.S.; HARIDASAN, M.; SILVA JR, M.C.; MENDONÇA, R.; REZENDE, A.V. Projeto Biogeografia do Bioma Cerrado: vegetação e solos. *Cadernos de geociências do IBGE*, Rio de Janeiro, v.12, p.75-66, 1994.
- FELFILI, J.M.; SILVA JR., M.C.; REZENDE, A.V.; NOGUEIRA, P.E.; WALTER, B.M.T.; SILVA, M.A.; ENCINAS, J.I. Comparação florística e fitossociológica do cerrado nas Chapada Pratinha e dos Veadeiros. In: LEITE, L.; SAITO, C.H. (eds.). *Contribuição ao conhecimento ecológico do cerrado*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1997. p.6-11
- FELFILI, J.M.; SILVA JR., M.C.; REZENDE, A.V.; SILVA, M.A. Changes in the floristic composition of cerrado *sensu stricto* in Brazil over a nine-year period. *Journal of Tropical Ecology*, Cambridge, v.16, p.579-590, 2000.
- FELFILI, J.M.; SILVA JR., M.C.; SEVILHA, A.C.; REZENDE, A.V.; NOGUEIRA, P.E.; WALTER, B.M.T.; SILVA, F.C.; SALGADO, M.A. Fitossociologia da vegetação arbórea. In: FELFILI, J.M.; SILVA JR., M.C. (eds.). *Biogeografia do Bioma Cerrado: estudo fitofisiológico na Chapada do Espigão Mestre do São Francisco*. Brasília: MMA/FAO/EMBRAPA/IBGE, 2001. p.35-61.
- HARIDASAN, M. Solos do Distrito Federal. In: PINTO, M.N. (ed.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1990. p.309-330.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. *Forest mensuration*. 2.ed. New York: Ronald Press, 1972. 417p.
- JORGE, L.A.B. Equação de volume comercial com casca em floresta tropical pluvial no norte do Espírito Santo. *Silvicultura em São Paulo*, São Paulo, v.16A, n.1, p.456-467, 1982.
- KAUFFMAN, J.B.; CUMMINGS, D.L.; WARD, D.E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along vegetation gradient in the Brazilian cerrado. *Journal of Ecology*, London, v.82, p.519-531, 1994.
- KENT, M.; COKER, P. *Vegetation description analysis*. London: Belhaven, 1992. 373p.
- MENDONÇA, R.C.; FELFILI, J.M.; WALTER, B.M.T.; SILVA JÚNIOR, M.C.; REZENDE, A.V.; FILGUEIRAS, T.S.; NOGUEIRA, P.E. Flora vascular do Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (org.). *Cerrado: ambiente e flora*. Brasília: EMBRAPA, 1998. p.289-556.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422p.
- PRIMACK, R.B.; RODRIGUES, E. *Biologia da conservação*. Londrina: Gráfica e Editora Midiograf, 2001. 327p.
- REIS, A.E.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L.; LEITE, H.G. Modelos de razão para estimar a biomassa de árvores individuais da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia brasileira. *Revista Árvore*, Viçosa, v.22, n.2, p.163-177, 1998.
- REZENDE, A.V. *Diversidade, estrutura, dinâmica e prognose do crescimento de um cerrado sensu stricto submetido a diferentes distúrbios por desmatamento*. 2002. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- ROSA, C.M.M. *Recuperação pós-fogo do estrato rasteiro de um campo sujo de cerrado*. 1990. 162p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1990.
- SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; LIMA, C.S.A. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana. *Cerne*, Lavras, v.1, p.123-134, 1995.
- SILVA, F.C. *Compartilhamento de nutrientes em diferentes componentes da biomassa aérea em espécies arbóreas de um cerrado*. 1990. 80p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1990.
- SILVA, J.N.M. *The behaviour of the tropical rain forest of the Brazilian Amazon after logging*. 1989. 335p. Tese (Doutorado) - Oxford University, Oxford, 1989.
- SOUZA, A.L.; JESUS, R.M. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies de Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares, ES. *Revista Árvore*, Viçosa, v.15, n.3, p.257-273, 1991.
- VALE, A.T. *Caracterização da biomassa lenhosa de um cerrado sensu stricto da região de Brasília para uso energético*. 2000. 111p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2000.
- ZAR, J.H. *Bioestatistical analysis*. 4.ed. New Jersey. Prentice Hall, 1999. 941p.

Recebido em 04/10/2004
Aceito para publicação em 20/04/2006