

## EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O PESO DE CARBONO FIXADO EM ÁRVORES DE *Mimosa scabrella* Bentham (BRACATINGA) EM POVOAMENTOS NATIVOS

Edilson Urbano<sup>1</sup>, Sebastião do Amaral Machado<sup>2</sup>, Afonso Figueiredo Filho<sup>3</sup>, Henrique Soares Koehler<sup>4</sup>

(recebido: 24 de agosto de 2007; aceito: 28 de maio de 2008)

**RESUMO:** Objetivou-se, na presente pesquisa, gerar equações para estimar peso de carbono fixado em bracatinga de povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba. Os dados para o desenvolvimento desta pesquisa foram obtidos de 194 árvores, distribuídas em diversas idades e diversos municípios dessa região. Nessas árvores foram medidas as variáveis altura total, altura de copa, altura do fuste, diâmetro à altura do peito e o diâmetro de copa. Cada árvore-amostra, após derrubada, foi dividida nos componentes fuste, galhos com diâmetro  $\geq 4$ cm, galhos com diâmetro  $< 4$ cm e folhas. O peso verde de cada componente foi obtido *in loco*. Amostras de cada componente verde foram coletadas, pesadas e trazidas para secagem em estufa até peso seco constante. Posteriormente, foi obtido o peso seco de cada componente por extrapolação dos pesos das amostras. Amostras de cada componente de 55 árvores foram moídas para determinação do teor de carbono. O DAP, a altura total e a altura do fuste foram as principais variáveis independentes usadas para compor as equações estimativas dos pesos de carbono para os componentes lenha, fuste e total. As equações ajustadas para estimar o peso de carbono das folhas e dos galhos apresentaram erros altos e coeficientes de determinação baixos.

Palavras-chave: *Mimosa scabrella*, carbono, equações, modelagem.

### EQUATIONS FOR ESTIMATE FIXED CARBON WEIGHT OF *Mimosa scabrella* Bentham OF NATIVE STANDS

**ABSTRACT:** This research aimed to generate equations for estimating fixed carbon weight of *Mimosa scabrella* Bentham of native stands from the Curitiba metropolitan region. The data for the development of this research came from 194 *Mimosa scabrella* trees distributed in stands with ages ranging from five to eighteen years located in several counties of the Curitiba metropolitan region. Every sample tree was felled down and divided in the following components: stem, thick branches (diameter  $\geq 4$  cm), thin branches (diameter  $< 4$  cm), foliage, and dead branches. The green weight of each tree component was weighted in the field. Small sub samples of each tree green component were also weighted in the field and brought to the laboratory for oven drying until reaching unchanged weight. Thus, it was obtained the dry weight of the whole component of the 194 trees by extrapolation of the sample weights. Small samples of each component from 55 trees were triturated for carbon content determination. DBH, total height and stem height were the main independent variables used for modeling carbon weights equations for the components firewood, stem and total. The adjusted equations for estimating carbon weight of the leaves and of the branches presented high standard errors and low determination coefficients.

Key words: *Mimosa scabrella*, carbon, equation, modeling.

## 1 INTRODUÇÃO

A *Mimosa scabrella* Bentham, conhecida popularmente como bracatinga, é uma importante fonte de matéria-prima energética e para recuperação de áreas degradadas. Seu manejo remonta ao início do século XX, quando se desencadeou um esforço para o fomento dessa espécie como produtora de lenha, estimulando um aumento gradativo da superfície ocupada pelos bracatingais. Por ter uma elevada taxa de crescimento, considerada uma das mais rápidas entre as árvores

brasileiras, a bracatinga é, atualmente, a espécie florestal nativa mais importante da região metropolitana de Curitiba, representando uma parte importante na economia, principalmente das pequenas propriedades rurais (BAGGIO, 1994).

Grandes superfícies da região metropolitana de Curitiba e de outras, principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina, estão florestadas com bracatinga, que formam densas associações, em que cerca de 60%, corresponde à bracatinga e o restante engloba mais de 80 espécies (BAGGIO, 1994).

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal MSc., Jarí Celulose S.A. – Vila Manguva, s/n – 62240-000 – Monte Dourado, PA – edurbano2@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor Sênior da Universidade Federal do Paraná/UFPR – Rua Lothário Meissner, 632 – 80210-170 – Curitiba, PR – Pesquisador 1A do CNPq – samachado@ufpr.br

<sup>3</sup>Professor e pesquisador da Universidade Federal do Paraná/UFPR e da UNICENTRO – Bolsista 1C do CNPq – Lothário Meissner, 632 – 80210-170 – Curitiba, PR – afonso@irati.unicentro.br

<sup>4</sup>Professor e Pesquisador da Universidade Federal do Paraná/UFPR – Lothário Meissner, 632 – 80210-170 – Curitiba, PR – koehler@ufpr.br

Segundo Hosokawa et al. (1998), as florestas têm, durante os últimos anos, recebido crescente atenção no que se refere ao seu potencial para contribuir com a redução do “efeito estufa”, por meio de sua capacidade de armazenar carbono, durante o processo natural de produção de biomassa. A expansão da cobertura florestal global apresenta-se como uma possibilidade para aumentar o estoque de carbono terrestre armazenado e diminuir o crescimento da concentração de gás carbônico na atmosfera.

Desta forma, o estabelecimento de florestas ou mesmo o uso de sistemas agroflorestais, pode contribuir de forma significativa com o aumento nos estoques de carbono e com a produção de bens duráveis com a madeira dessas florestas, bem como o aumento da vida útil desses produtos garantirá que o carbono estocado seja maior que a taxa de degradação da madeira (ROCHADELLI, 2001). Segundo esse autor, a longo prazo, a substituição de combustíveis fósseis pela biomassa será o meio mais efetivo na redução de emissões de carbono.

Sanquetta & Balbinot (2004), reportaram que várias empresas e entidades representativas, públicas e privadas, passaram a investir em projetos de pesquisa de fixação de carbono, para obtenção de créditos visando compensar parte das emissões. Esse fato tem proporcionado o surgimento de um novo mercado e de novas oportunidades de negócios para esse setor.

A absorção de dióxido de carbono se dá, em parte, pelo período de tempo existente entre o crescimento acelerado das plantas e a morte e decomposição delas. Desse modo, as florestas são importantes para o equilíbrio do balanço global de gás carbônico, pois os diferentes tipos de florestas armazenam diferentes quantidades de carbono em função dos estágios de sucessão, da idade, do regime de manejo e da composição de espécies (WATZLAWICH et al., 2004).

Devido ao potencial de fixação de carbono das árvores de bracatingais nativos e o crescente interesse global por esse assunto, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos de estimativa do teor de carbono fixado, com a finalidade da quantificação do seu estoque, facilitando o planejamento e a valorização dos povoamentos de bracatinga. Objetivou-se, neste trabalho, gerar equações para estimar o peso de carbono fixado em bracatinga de povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e caracterização da área de estudo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dados provenientes de bracatingais nativos da Região Metropolitana de Curitiba, coletados principalmente na região norte onde sua ocorrência é maior. Segundo o sistema da classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfb, que corresponde ao clima temperado, mesotérmico úmido sem estação seca definida, com quatro estações bem definidas, com verões quentes e chuvosos e invernos frios com períodos secos eventuais. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente fica abaixo de 22°C. A temperatura média anual se apresenta em torno de 17°C, com mínimas de 12°C e máximas de 23°C. A precipitação média anual situa-se entre 1.300 e 2.500 mm, com leve diminuição no inverno, não ocorrendo déficits hídricos (IAPAR, 1994; MAACK, 1981).

A região de estudo, apresenta relevo predominantemente ondulado a fortemente ondulado. Os solos, na maioria, são cambissolos álicos, com diferentes graus de profundidade e fertilidade, e de maneira geral, são solos pobres, pouco desenvolvidos, ácidos, com teores elevados de alumínio e baixa saturação de bases.

### 2.2 Obtenção dos dados

Os dados para o ajuste das equações para estimar o carbono fixado em bracatinga foram coletados em 194 árvores-amostra distribuídas em diferentes classes de idades e de diâmetros, originárias de diversas localidades dos municípios da região metropolitana de Curitiba. Na Figura 1 observa-se distribuição dos dados por classe de diâmetro e de altura.

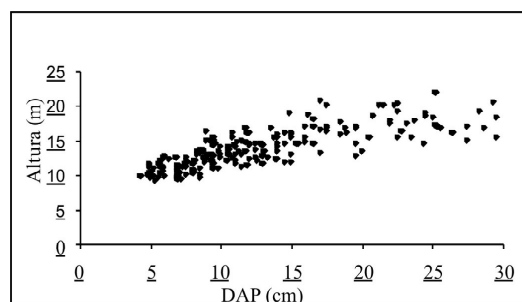


Figura 1 – Distribuição das árvores-amostra por diâmetro e altura.

Figure 1 – Distribution of sampled trees by diameter and height.

Para se calcular o peso de carbono, primeiro foi preciso calcular o peso da biomassa seca de cada componente, através do seguinte procedimento: árvores representativas foram selecionadas por classes de idade e por classe de diâmetro; com a árvore ainda em pé, mediu-se o diâmetro de copa tomando a média de duas medições transversais feitas com trena (m), e o DAP (cm). Em seguida, derrubou-se a árvore e mediu-se a altura total, a altura do fuste e a altura de copa; dividiu-se cada árvore nos componentes: fuste, galhos maiores do que 4 cm de diâmetro, galhos menores do que 4 cm de diâmetro e folhagem. Pesaram-se cada componente da árvore, recolheram-se amostras de cada componente em sacos plásticos e posteriormente pesaram-se todas as amostras verdes, seguindo a metodologia descrita em Urbano (2007).

Posteriormente, essas amostras foram levadas para o laboratório; elas foram fracionadas em tamanhos menores, sendo em seguida secas em estufa à 103° C, até peso constante. Após pesadas, calculou-se o percentual da biomassa seca dos componentes, seguindo também a metodologia detalhada em Urbano (2007).

Os pesos secos de cada componente das árvores foram obtidos por simples consideração do percentual do peso seco sobre o peso verde obtido após a secagem das amostras. O peso seco total foi obtido somando os pesos de todos os componentes e o peso seco da lenha foi obtido pela soma do peso do componente fuste com o peso dos galhos até um diâmetro mínimo de 4 cm. Os teores percentuais de biomassa das amostras de cada componente foram calculados com base na relação: teor de matéria seca = (peso seco / peso verde) \* 100.

Os teores de carbono foram obtidos com base em análises feitas nas amostras retiradas das primeiras 55 árvores coletadas, distribuídas em todas as classes de diâmetro e idades, originárias de várias localidades. Depois de secas em estufa as amostras foram moídas em um moinho de facas e submetidas às análises de carbono por queima total no aparelho analisador de carbono Leco C144, no Laboratório de Inventário Florestal, do Departamento de Ciências Florestais da UFPR. Essa análise consiste em introduzir uma pequena amostra no reator do aparelho, onde todo o carbono é convertido em dióxido de carbono, medido diretamente no detector que indica a quantidade de carbono existente na amostra, em porcentagem.

Os pesos de carbono de cada componente das 55 árvores amostradas foram obtidos por simples consideração do percentual do teor de carbono sobre o

peso seco dos componentes. O peso de carbono total foi obtido somando o peso de todos os componentes. O peso de carbono do componente lenha foi obtido pela soma do peso de carbono do fuste com o peso de carbono dos galhos até um diâmetro de 4 cm. Para as demais árvores amostradas (56 a 194) considerou-se o teor médio de carbono para cada componente na obtenção do peso de carbono fixado.

### 2.3 Estimativa do peso de carbono

O teor médio de carbono de cada componente foi usado como fator de conversão de peso de matéria seca (biomassa) para peso de carbono (pc), obtendo-se assim a variável dependente dos modelos de regressão ajustados, independentemente, para cada componente da árvore.

Para estimativa do peso de carbono fixado nos componentes das árvores de bracatinga, ajustaram-se 20 modelos de regressão por componente, sendo 10 aritméticos e 10 logarítmicos, tendo como variável dependente o peso de carbono dos componentes (pc em kg) e como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito - DAP (d, em cm), a altura total (h, em m), a altura do fuste (hf, em m), a altura de copa (hc, em m), o diâmetro de copa (dc, em m) e a combinação dessas variáveis na forma aritmética e logarítmica. Foi construída uma equação na forma aritmética e outra na forma logarítmica para cada um dos componentes das árvores utilizando o método de seleção "forward". Os modelos utilizados apresentam-se na Tabela 1.

A seleção do melhor modelo foi baseada no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), no erro-padrão da estimativa em porcentagem (Syx%) e análise gráfica dos resíduos em porcentagem.

Os modelos logarítmicos foram corrigidos quanto à discrepância logarítmica pelo Fator de Correção de Meyer, antes do recálculo do Syx para a unidade quilograma.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, são apresentadas as estatísticas das variáveis dendrométricas e dos pesos de carbono obtidos de componentes da parte aérea das árvores de bracatinga com idades entre 5 e 17 anos. Observa-se, nessa tabela, que o coeficiente de variação dos pesos dos componentes e das variáveis medidas no campo apresenta valores altos, fato normal quando se trabalha com espécies nativas devido à grande amplitude entre os valores mínimos e máximos encontrados.

**Tabela 1** – Modelos testados para estimar o peso de carbono de cada componente da parte aérea das árvores de bracinga.**Table 1** – Tested models for estimating carbon weight for each aerial component of *Mimosa scabrella* trees.

Nº	Aritmética	Logarítmica
1	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \ln \varepsilon$
2	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d^2 + \ln \varepsilon$
3	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d^3 + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d^3 + \ln \varepsilon$
4	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h + \ln \varepsilon$
5	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 hf + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln hf + \ln \varepsilon$
6	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d^2 h + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d^2 h + \ln \varepsilon$
7	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d^2 hf + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d^2 hf + \ln \varepsilon$
8	$p_c = \beta_0 + \beta_1 dc + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln dc + \ln \varepsilon$
9	$p_c = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 dc + \varepsilon$	$\ln p_c = \beta_0 + \beta_1 \ln d^2 + \beta_2 \ln dc + \ln \varepsilon$
10	Forward	Forward

P<sub>c</sub>=Peso de carbono (kg); d=DAP (cm); dc=diâmetro de copa (m); h=altura total (m); hf=altura de fuste (m);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$  = parâmetros dos modelos.

**Tabela 2** – Estatísticas das variáveis dendrométricas e dos pesos de carbono de componentes da parte aérea de árvores de bracinga.**Table 2** – Statistics of the dendrometric variables and carbon weights by aerial tree component of *Mimosa scabrella*.

Estatísticas	Variáveis medidas no campo					Peso de carbono dos componentes (kg)					
	d(cm)	h(m)	d <sub>c</sub> (m)	h <sub>f</sub> (m)	h <sub>c</sub> (m)	Fuste	G ≥ 4	G < 4	Folhas	Lenha	Total
Mínimo	4,3	9,2	0,6	2,6	1,7	0,9	0,2	0,4	0,0	0,9	2,1
Média	13,0	13,9	3,0	8,8	5,2	25,9	11,2	2,5	2,0	33,8	38,4
Máximo	29,5	21,8	7,4	15,5	12,0	102,1	69,7	10,2	8,8	161,0	179,7
CV %	48,5	20,3	57,3	29,0	38,3	101,8	136,8	95,6	99,3	112,2	108,8

A Tabela 3 indica os teores percentuais de carbono encontrados em cada componente da parte aérea das árvores analisadas, com os valores máximos, médios e mínimos, bem como o coeficiente de variação para cada componente. Com base nesses teores, calculou-se o peso de carbono para cada componente e ao somar esses pesos obteve-se o peso total e peso da porção lenha das árvores. Observa-se, nessa tabela, que o coeficiente de variação é baixo para todos os componentes analisados, indicando pouca variabilidade entre as árvores-amostra.

Rochadelli (2001), estudando a estrutura de fixação de carbono em reflorestamento de bracinga, verificou que diferentes classes sociológicas apresentam diferentes quantidades dos constituintes da biomassa, tanto na

madeira quanto na casca. Verificou que a concentração de carbono varia em torno de 40 a 45% da biomassa total.

Soares & Oliveira (2002), após analisarem as estimativas das quantidades médias de carbono presentes nos fustes (com e sem casca), nos galhos e nas folhas de árvores de eucalipto, constataram que o fuste sem casca representa a parte aérea da árvore com maior quantidade de carbono (83,24%), seguido dos galhos (6,87%), da casca (6,62%) e das folhas (2,48%). Além disso, verificaram uma nítida tendência de aumento da quantidade de carbono das diferentes partes das árvores com o tamanho delas.

Higuchi & Carvalho Junior (1994), ao analisarem várias espécies da Floresta Tropical Úmida Densa de Terra

**Tabela 3** – Estatísticas do teor de carbono em % dos componentes da parte aérea das árvores de bracinga.**Table 3** – Statistics of carbon content in % of the tree aerial components of *Mimosa scabrella*.

Estatísticas	Componentes				
	Folhas	Fuste	Galhos < 4	Galhos ≥ 4	Casca
Mínimo	42,59	41,51	41,03	41,42	41,06
Média	45,46	43,69	44,14	43,95	44,69
Máximo	47,78	45,16	46,35	45,68	48,30
Coefficiente Variação	2,79	2,23	2,65	2,50	3,39

Firme, na região de Manaus, AM, concluíram que o teor médio de carbono para o tronco é de 48,4%, para liteira de 39,3%, para plântulas de 46,5%, para mudas de 49,3% e de 46,8% para galhos vivos.

### 3.1 Pesos de carbono total

Conforme observa-se na Tabela 4, as equações ajustadas apresentaram uma variação do  $R^2_{aj}$  entre 0,728 e 0,959 e  $S_{yx}$  entre 21,75 e 56,16%. A equação que propiciou o melhor desempenho, na forma aritmética foi a número 10, obtida pelo método de seleção “forward”, cujo gráfico de resíduo e gráfico de distribuição dos dados reais sobre o estimado são apresentados na Figura 2.

Observa-se na Figura 2 que não existem tendências marcantes na estimativa dos pesos de carbono, ao longo de toda a amplitude dos dados. Essa equação tem na sua composição, além do DAP e altura total, as variáveis diâmetro de copa e altura de copa, tendo sua aplicação limitada pela dificuldade de medir-se essas variáveis em campo.

Alternativamente, recomenda-se usar a seguinte equação:  $pc = -4,08046 + 0,20748d^2$ , com  $R^2_{aj}$  de 0,949,  $S_{yx}$  de 24,44% e com grandes vantagens operacionais e de custo, visto que exige apenas a medição do DAP (d).

Essa equação apresentou distribuição de resíduos sem tendenciosidade, conforme pode ser constatado na Figura 3.

### 3.2 Peso de carbono da lenha

As equações ajustadas para estimar o peso de carbono do componente lenha das árvores apresentaram erro padrão da estimativa variando de 21,26 a 58,98% e coeficiente de determinação ajustado variando de 0,719 a 0,963. A equação escolhida para uso foi a  $lnp_c = -4,10012 + 2,2544*ln d + 0,55827*ln h$ , com  $R^2_{aj}=0,95$  e  $S_{yx} = 24,81\%$ . Para essa equação o fator de correção da discrepância

logarítmica de Meyer foi de 1,0166. Essa equação apresentou distribuição residual sem tendenciosidade conforme pode ser observado na Figura 4, sendo então recomendada para uso na estimativa do peso de carbono da lenha da bracinga.

### 3.3 Peso de carbono do fuste

As equações para estimar o peso de carbono do fuste apresentaram erro-padrão da estimativa variando de 18,27 a 58,22 % e coeficiente de determinação ajustado, variando de 0,666 a 0,970.

Por sua simplicidade, a equação recomendada para estimativa do peso de carbono do fuste é a  $lnpc = -3,62906 + 1,94733*ln d + 0,74518*ln h$ , com um erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ) de 19,94% e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,96 e com distribuição residual sem tendência ao longo da linha de regressão (Figura 5). Para essa equação o fator de correção da discrepância logarítmica de Meyer foi 1,0112.

### 3.4 Peso de carbono dos galhos até diâmetros e ≥ 4 cm

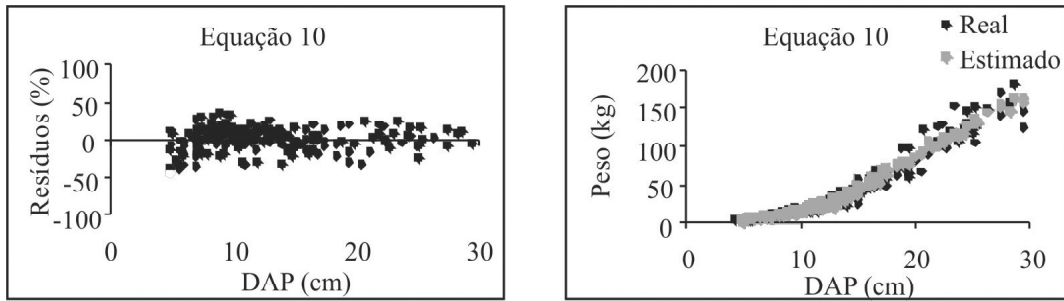
O desempenho de todas as 20 equações foi insatisfatório, com erro-padrão da estimativa variando de 39,32 a 103,20% e coeficiente de determinação variando de 0,454 a 0,916. O menor erro e o maior coeficiente de determinação ajustados foram os da equação obtida pelo método de seleção “forward”, que usa como variáveis independentes o DAP, a altura do fuste, a altura total e o diâmetro de copa em suas combinações, compondo a equação:  $pc = -10,7403 + 0,0339d^2 + 0,0077d^2h - 0,0106d^2hf + 68,3388d^{-1} + 0,1813dc^2$ . Recomenda-se o uso dessa equação para estimativa do peso de carbono dos galhos maiores do que 4 cm de diâmetro. Todas as outras equações ajustadas apresentaram altos  $syx\%$  e baixos  $R^2_{aj}$  e por isso não se recomendou nenhuma outra equação mais simples para esse componente.

**Tabela 4** – Equações ajustadas para estimar o peso de carbono total por árvore, com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa em porcentagem (syx%) e fator de correção de Meyer.

**Table 4** – Fitted equations for estimating total carbon weight per tree, with their respective adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error of estimate in percentage (syx%) and Meyer's correction factor.

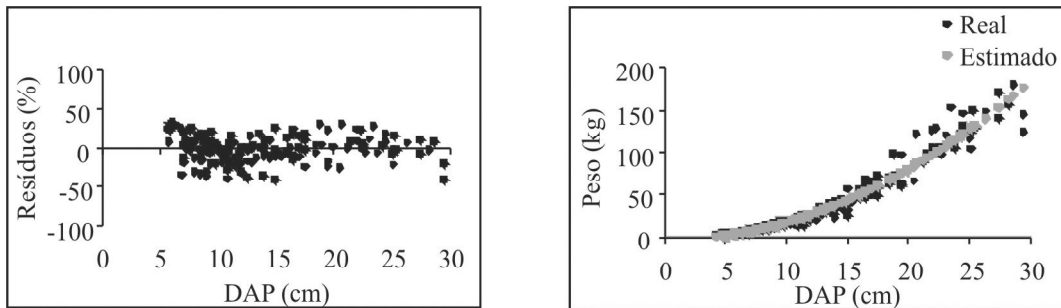
Nº	Aritmética	Syx %	$R^2_{aj}$	
1	pc = -44,55118 + 6,4296d	32,48	0,909	
<b>2**</b>	<b>pc = -4,08046 + 0,20748d<sup>2</sup></b>	<b>24,44</b>	<b>0,949</b>	
3	pc = 10,13385 + 0,00739d <sup>3</sup>	32,81	0,907	
4	pc = -36,43308 + 6,74181d - 0,87528h	32,50	0,909	
5	pc = -35,71096 + 6,68624d - 1,38915hf	31,75	0,913	
6	pc = 1,52792 + 0,01138d <sup>2</sup> h	27,31	0,936	
7	pc = 2,37504 + 0,01825d <sup>2</sup> hf	43,04	0,840	
8	pc = -24,42372 + 21,18428dc	56,16	0,728	
9	pc = -8,29538 + 0,18605d <sup>2</sup> + 2,90069dc	23,93	0,951	
10*	pc = 107,88863 - 15,4325d + 0,63623d <sup>2</sup> + 0,02034d <sup>2</sup> h + 3,25814dc - 255,89286d <sup>-1</sup> - 0,001d <sup>3</sup> h ==> "Forward"	21,75	0,959	
Nº	Logarítmica	Syx %	$R^2_{aj}$	FC Meyer
1	lnpc = -2,69957 + 2,32599ln d	42,94	0,842	1,0133
2	lnpc = -2,69957 + 1,15799ln d <sup>2</sup>	42,92	0,842	1,0133
3	lnpc = -2,69957 + 0,76533ln d <sup>3</sup>	44,17	0,833	1,0133
4	lnpc = -3,33517 + 2,16636ln d + 0,41676ln h	44,10	0,833	1,0121
5	lnpc = -2,80081 + 2,25396ln d + 0,16003ln hf	43,17	0,840	1,0131
6	lnpc = -4,441 + 1,0002ln d	48,47	0,799	1,0134
7	lnpc = -3,63465 + 0,95477ln d <sup>2</sup> hf	51,03	0,777	1,0384
8	lnpc = 1,47272 + 1,73331ln dc	55,92	0,732	1,1101
9	lnpc = -2,34832 + 1,07012ln d <sup>2</sup> + 0,19113ln dc	42,53	0,845	1,0123
10	lnpc = -2,69957 + 2,32599ln d ==> "Forward"	42,94	0,842	1,0133

Onde: pc = peso carbono (kg); d = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m); hf = altura do fuste (m); hc = altura de copa(m); dc = diâmetro de copa(m); ln = logaritmo neperiano; \* Melhor equação ajustada; \*\* Equação recomendada para uso.



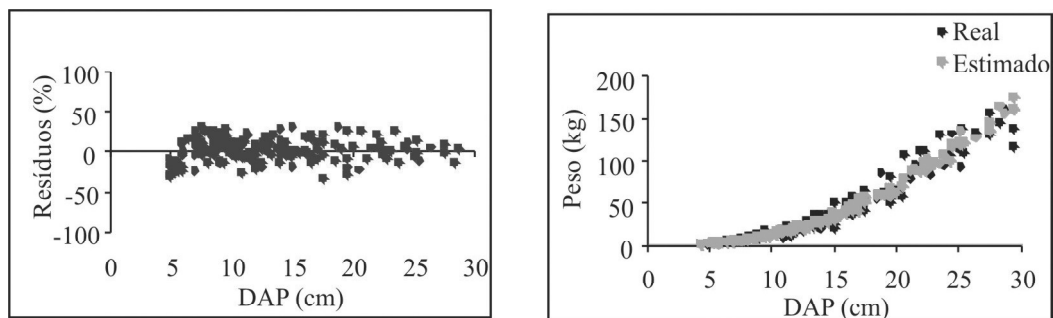
**Figura 2** – Distribuição dos resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação de melhor ajuste para peso de carbono total.

*Figure 2* – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the best fitted equation for estimating total carbon weight.



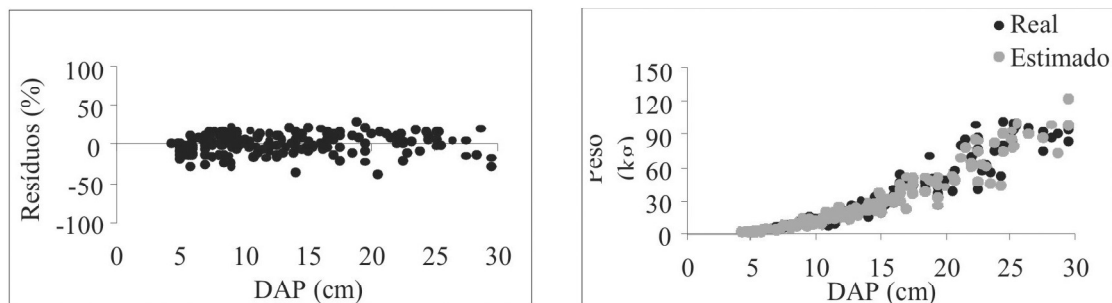
**Figura 3** – Distribuição dos resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação selecionada para peso de carbono total.

*Figure 3* – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the selected equation for total carbon weight.



**Figura 4** – Distribuição dos resíduos da equação selecionada para peso de carbono da lenha.

*Figure 4* – Residual distribution from the selected equation for firewood carbon weight.



**Figura 5** – Distribuição dos resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação selecionada para peso de carbono do fuste.

**Figure 5** – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the recommended equation for estimating stem carbon weight.

Observando-se a Figura 6, verifica-se que as distribuições dos resíduos apresentam alta dispersão nas classes de menor diâmetro, porém sem tendenciosidade, ao longo de toda linha de regressão. O comportamento dos dados estimados sobre os dados reais mostra que, apesar do erro alto, a equação em média explica o peso de carbono encontrado para as árvores de bracatinga, podendo ser usada para grandes quantidades de dados, pois dessa forma os erros positivos e negativos se compensarão.

### 3.5 Peso de carbono dos galhos menores do que 4 cm de diâmetro

As 20 equações ajustadas apresentaram erro-padrão da estimativa variando de 38,19 a 53,13% e coeficiente de determinação variando de 0,664 a 0,849. O menor erro e o maior coeficiente de determinação foi da equação obtida pelo método “forward”:  $pc = -4,23039 - 1,06292d + 0,09233d^2 - 0,00177d^3$ , que usa como variável independente o DAP, em suas combinações, formando uma equação polinomial de 3º grau.

Analisando os gráficos da Figura 7, observa-se que os resíduos apresentaram-se não tendenciosos e a curva dos valores estimados sobre os dados reais indica que a equação, em média, estima bem os pesos de carbono dos galhos menores do que 4 cm de diâmetro.

### 3.6 Peso de carbono das folhas

As 20 equações obtidas para estimar o peso de carbono das folhas tiveram erro-padrão da estimativa variando de 42,57 a 75,21% e coeficiente de determinação variando de 0,413 a 0,795. O menor erro e o maior coeficiente de determinação foram da equação  $pc = -0,93385 + 0,324062d - 0,129035hf$  que é também a recomendada para uso. A

distribuição de resíduos apresentados na Figura 8 indica que não há tendência ao longo da linha de regressão e que os valores estimados sobre os valores reais têm boa distribuição.

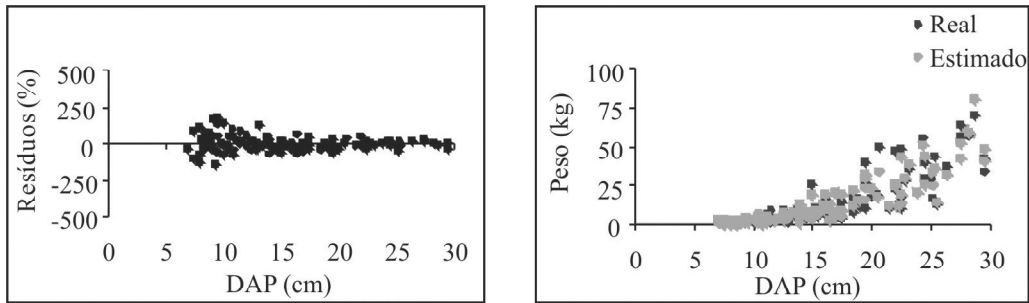
Soares & Oliveira (2002), estudando equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Estado de Minas Gerais, ajustaram o modelo ( $y = \beta_0 * d^{\beta_1} * h_t^{\beta_2}$ ) de Schumacher e Hall, o qual apresentou os seguintes coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro-padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) para os componentes: fuste sem casca:  $R^2 = 0,99$  e  $S_{yx} = 16,30\%$ ; fuste com casca:  $R^2 = 0,99$  e  $S_{yx} = 14,98\%$ ; galhos:  $R^2 = 0,89$  e  $S_{yx} = 39,37\%$ ; folhas:  $R^2 = 0,86$  e  $S_{yx} = 57,33\%$ .

Resende (2002), estudando o Cerrado *Sensu Stricto*, ajustou vários modelos para estimar o estoque de carbono, tendo como melhor resultado entre os modelos testados, um composto pelo diâmetro da base (db) e altura total (ht) - Modelo do fator de forma constante -  $y = \beta_1 d_b^2 h_t$ . Essa equação apresentou coeficiente de determinação ( $R^2_{aj}$ ) de 0,98 e erro-padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) de 26,01%, para estoque de carbono. Foi considerado como teor médio de carbono, o valor de 50% da biomassa seca.

Soares et al. (2005), ajustaram o modelo de Schumacher e Hall para 532 árvores de *Eucaliptus grandis*, com idades entre 32 e 40 meses, de plantios pertencentes a Cenibra S. A., em Minas Gerais. Encontraram para estimativa do peso do carbono total do fuste um  $R^2$  de 0,98 e  $S_{yx}$  de 0,1244 ln(kg) e para estimar o peso de carbono do fuste sem casca uma equação com  $R^2$  de 0,98 e  $S_{yx}$  de 0,1273 ln(kg), com distribuição residual mostrando tendência de superestimativa para as árvores de maior diâmetro em ambas equações.

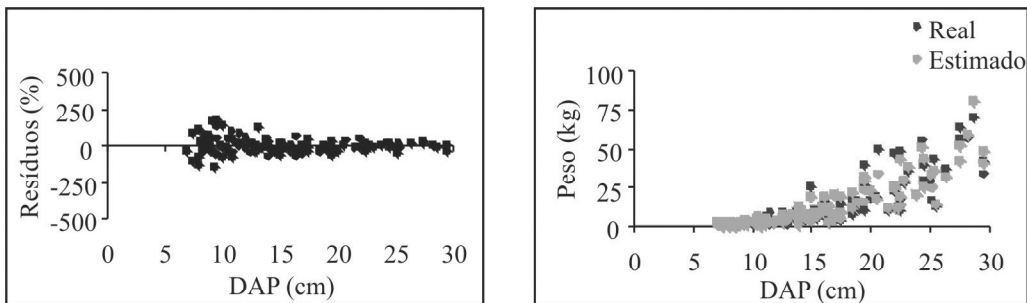
Os resultados de todos os modelos constantes da Tabela 1, ajustados para todos os componentes das árvores, podem ser encontrados em Urbano (2007).





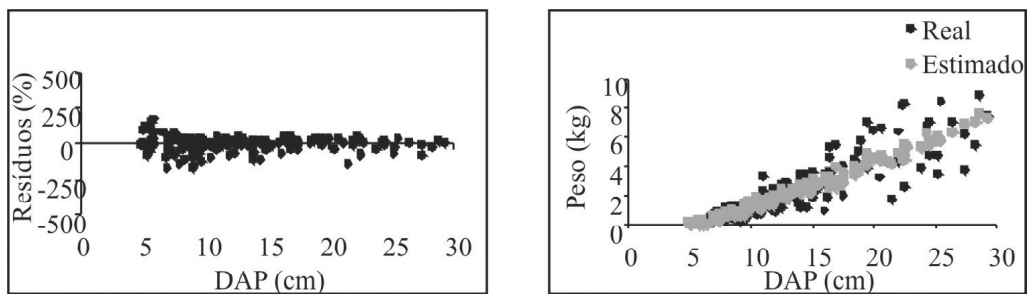
**Figura 6** – Distribuição dos resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação selecionada para peso de carbono dos galhos maiores do que 4 cm de diâmetro.

*Figure 6* – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the equation for estimating carbon weight of the branches with diameters  $e > 4$  cm.



**Figura 7** – Distribuição dos resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação selecionada para peso de carbono dos galhos menores do que 4 cm de diâmetro.

*Figure 7* – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the best fitted equation for carbon weight of the branches with diameter  $< 4$  cm.



**Figura 8** – Distribuição de resíduos e comportamento dos dados estimados em relação aos dados reais da equação selecionada para estimativa do peso de carbono das folhas.

*Figure 8* – Residual distribution and behavior of the estimated data in relation to the observed data of the selected equation for carbon weight of the leaves.

#### 4 CONCLUSÕES

O DAP, em sua forma quadrática, foi a variável independente mais adequada para a estimativa do peso de

carbono total. Para estimativa do peso de carbono da lenha, as variáveis DAP e altura total mostraram-se mais adequadas. Já para a estimativa do peso de carbono do fuste, o DAP e a altura do fuste na forma logarítmica são as

variáveis mais adequadas para as árvores dos bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba, com idades variando de 5 a 17 anos e diâmetros entre 08 e 30 cm.

Apesar dos altos erros residuais das equações ajustadas para estimar o peso de carbono das folhas e dos galhos, elas podem ser usadas em trabalhos extensivos de inventários de carbono, tendo em vista que a distribuição dos resíduos das equações selecionadas para cada um dos componentes mostrou-se sem tendências.

A inclusão de outras variáveis simples ou combinadas, tanto na forma aritmética quanto na forma logarítmica, não produziram grandes melhoras no ajuste das equações, quando comparadas com as equações formadas apenas com o DAP, a altura total ou altura do fuste, nem pelo método de seleção “forward”.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGGIO, A. J. **Estudio sobre el sistema agroforestal tradicional de la bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) en Brasil**: productividad, manejo de residuos y elaboracion de compost. 1994. 242 f. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1994.
- HIGUCHI, N.; CARVALHO JUNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono das espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub>: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 125-153.
- HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. **Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 1998. 162 p.
- IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina, 1994.
- MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 2. ed. Rio de Janeiro: J. Olympio; Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981. 450 p.
- RESENDE, A. V. **Diversidade, estrutura, dinâmica e prognose do crescimento de um Cerrado Sensu Stricto submetido a diferentes distúrbios por desmatamento**. 2002. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- ROCHADELLI, R. **A estrutura de fixação dos átomos de carbono em reflorestamento: estudo de caso: *Mimosa scabrella* Bentham, Bracatinga**. 2001. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologia para determinação de biomassa florestal. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO, 2., 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2004. p. 77-94.
- SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, 2005.
- SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. de. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, set./out. 2002.
- URBANO, E. **Quantificação e estimativa da biomassa e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO, 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2004. p. 95-109.