

MODELOS DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA PARA COMPONENTES DA BIOMASSA DE POVOAMENTOS ADULTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.

Paulo Henrique Corrêa Korbela do Rosário^{1*}

^{1*}Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil - phcorrekr@gmail.com

Resumo

É essencial à aplicação do uso de equações para estimar a produção energética das árvores, pois assim contribuem para a redução dos custos, tornando-se técnicas economicamente viáveis. O presente trabalho teve por objetivo comparar modelos matemáticos e encontrar uma equação para estimar o estoque energético da biomassa da copa e do fuste de árvores de *Acacia mearnsii* De Wild. Os dados foram coletados de 90 árvores com 10 anos de idade em 3 locais diferentes localizados no Estado do Rio Grande do Sul. A determinação da produção energética foi realizada através da relação entre a biomassa e o poder calorífico superior das amostras, com base em correlações do poder calorífico, diâmetro e altura total das árvores. Para tanto, foi utilizada a estatística descritiva dos dados, bem como, técnicas de análise de regressão. As melhores equações para produção energética foram: modelo 5 para PE do fuste, modelo 3 para PE da copa e modelo 5 para PE total. Tais equações apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,90 e erros padrões percentuais entre 13,10 e 32,44%.

Palavras-chave: Energia da biomassa florestal; propriedades energéticas; bioenergia; floresta energética.

INTRODUÇÃO

Considerada uma fonte renovável e alternativa de energia, a biomassa consiste em um material orgânico de origem vegetal. Com potencial para aproveitamento energético, uma das principais características da biomassa é a variedade em que a mesma é encontrada no ambiente. De acordo com Mueller (2005), a biomassa florestal pode ser adquirida na forma de florestas nativas e plantios energéticos, resíduos industriais, resíduos florestais e agrícolas. Quantificação da biomassa para fins energéticos, fixação de carbono e avaliação do crescimento e produção de uma determinada espécie, são alguns exemplos de estudos de biomassa florestal que têm sido realizados. Devido a elevada importância desse tipo de material produzido pelo setor agroflorestal, torna-se necessário o estudo das suas propriedades energéticas.

Alguns fatores são importantes para a utilização da madeira para fins energéticos, dentre eles deve-se destacar o conhecimento do seu potencial para produção de biomassa florestal e do seu poder calorífico. O poder calorífico consiste na quantidade de energia na forma de calor liberado durante a combustão completa de uma determinada quantidade de massa do material combustível (CINTRA, 2009).

De acordo com Cintra (2009), existem duas maneiras para se expressar o poder calorífico de um material combustível, sendo o poder calorífico superior (PCS) e o inferior (PCI). No poder calorífico superior, a água formada durante a combustão (volume constante) é condensada e o calor resultante é recuperado. Já no PCI o calor de condensação da água é desconsiderado pela perda na forma de vapor, por isso o PCS é mais usual e está presente em diversos trabalhos de pesquisa.

O aproveitamento da biomassa florestal para geração de energia representa um dos segmentos mais importantes do modelo de desenvolvimento econômico e social baseado no uso e na valorização da floresta. As espécies florestais são fonte importante de energia no Brasil, com a produção de carvão e lenha. As principais espécies utilizadas com intuito comercial no país são as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Outros grupos de espécies oriundas de florestas plantadas são bastante utilizados para fins energéticos, porém têm uma importância local, a exemplo da acácia-negra (*Acacia mearnsii*), *Acacia mangium*, seringueira (*Hevea brasiliensis*) e outras.

A *Acacia mearnsii* De Wild., popularmente conhecida como acácia-negra, pertencente à família Fabaceae, ocupa a 3ª posição entre as espécies florestais mais plantadas no Brasil, sendo superada apenas por espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (SFB, 2013). Originária da Austrália, a acácia-negra é plantada comercialmente no Rio Grande do Sul, onde se caracteriza por apresentar um rápido crescimento, podendo chegar a atingir 18 m de altura na fase adulta (FREDDO, 1997). De acordo com Caldeira *et al.* (2002), a rotação se estende entre 7 a 9 anos de idade, quando ocorre o corte raso da floresta.

No Brasil, o primeiro plantio de acácia-negra foi realizado em 1918 por Alexandre Bleckmann, especificamente no município de São Leopoldo – RS (OLIVEIRA, 1968). Atualmente, apresenta-se como uma espécie de elevada importância econômica no sul do país, com uma área de plantio de 160.827 ha (IBÁ, 2015). De acordo com Resende *et al.* (1992), a madeira é fonte para vários usos, desde o emprego tradicional como carvão e lenha, também é utilizada na fabricação de papel e celulose, bem como, é a principal fonte de casca para a indústria de taninos vegetais em escala global, utilizados principalmente no curtimento de peles.

De acordo com Santana (2009), é essencial que os trabalhos acadêmicos visem à aplicação do uso de equações para estimar a produção energética das árvores, pois assim, contribuem para a redução dos custos, quando se considera um número elevado de amostras para serem analisadas, tornando-se técnicas economicamente viáveis.

Sendo assim, o presente estudo teve por objetivo desenvolver modelos para a estimativa da produção energética por componente da biomassa das árvores de Acácia negra.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras utilizadas neste trabalho foram oriundas de experimentos com povoamentos comerciais de acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) situados no estado do Rio Grande do Sul. Esses locais foram divididos em três regiões, denominadas: município de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini. Em cada região foi amostrado um povoamento com aproximadamente 10 anos de idade.

No município de Cristal, o povoamento está sob coordenadas geográficas centrais 31°07'26,1" S e 52°05'10,8" W, já no município de Encruzilhada do Sul o povoamento está sob coordenadas geográficas centrais 30°27'35,8" S e 52°36'23,7" W, enquanto no município de Piratini o povoamento está sob coordenadas geográficas centrais 31°24'46,5" S e 52°57'26,7" W.

De acordo com Behling (2016), os plantios foram estabelecidos tanto em áreas novas como em áreas de reformas da plantação. O preparo do solo foi realizado somente na linha de plantio, com uma subsolagem com 3 hastes a 40 cm de profundidade e duas gradagens. Nas três regiões os plantios foram realizados manualmente e durante essa operação foi adicionado 50 g de NPK (5-30-15) por muda. O espaçamento de plantio foi de 3 m entre linhas por 1,75 m entre plantas na linha. A única atividade realizada foi a roçada das plantas daninhas durante os dois primeiros anos após o plantio. As roçadas foram realizadas mecanicamente com uso de trator e roçadeira agrícola.

Em cada povoamento foram instaladas quatro parcelas circulares, de maneira aleatória, com 400 m² (22,56 m de diâmetro) e no centro de cada uma delas foi instalada uma subparcela de 78,54 m² (diâmetro de 10 m). Devido ao alto custo de se mensurar todas as variáveis de todas as árvores na parcela, optou-se pelo procedimento de instalar uma subparcela de menor tamanho no interior da parcela.

Foram feitas avaliações das variáveis diâmetro à altura do peito (d) e altura total no interior das parcelas. No interior das subparcelas, todas as árvores foram derrubadas e mensuradas quanto ao diâmetro à altura do peito, altura total, biomassa da copa e do fuste. Sendo assim, o presente trabalho envolveu a instalação de 12 parcelas temporárias.

Dentro das parcelas, o diâmetro à altura do peito (d) foi mensurado utilizando uma fita dendrométrica e a altura total com um hipsômetro de Haglöf. Já nas subparcelas, o diâmetro à altura do peito foi mensurado utilizando uma fita dendrométrica e a altura total com uma trena. Tomando as concepções definidas por Picard *et al.* (2012), a mensuração da biomassa foi realizada para o componente do fuste e da copa. Utilizando uma balança digital *Portable Electronic Scale*® com precisão de 5 g, esses componentes foram separados para cada árvore e pesados para a determinação da biomassa úmida.

Já para a determinação da biomassa seca do fuste e da copa, foi utilizado uma balança digital Hoyle® com precisão de 1 g, na qual foram retiradas amostras e imediatamente tomadas suas massas. As amostras do fuste foram de 5 discos de 2 cm de espessura nas posições 0%, 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total. Para a copa foram retirados aproximadamente 1,5kg e tomadas ao longo da árvore nas posições 0%, 25%, 50%, 75% e 95% em relação ao comprimento total da copa.

As amostras dos diferentes compartimentos foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 100 °C até atingir massa constante, pesado com uma balança digital de precisão de 1 g, através de sucessivas tomadas de massas. A biomassa seca foi obtida conforme:

$$B_m = \frac{MU \cdot MS}{MUA}$$

Em que: B_m é a biomassa seca do componente (kg); MU é a massa úmida do componente (kg); MS é a massa seca da amostra do componente (kg); MUA é a massa úmida da amostra do componente (kg).

Em estudo sobre o ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira, Silva *et al.* (2012) afirmam que não existe variação significativa do PCS ao longo do fuste de *Acacia mearnsii*, portanto, para a determinação do poder calorífico superior da madeira, foram utilizados os discos obtidos na amostragem, sendo esses reduzidos em tamanho utilizando-se um moinho de facas, visando a obtenção de um material fino e uniforme. Este material foi seco em estufa de circulação e renovação do ar para obtenção da matéria seca. Após serem retiradas da estufa, foram colocadas em dessecador para resfriamento e, aproximadamente, 0,5 g foram utilizadas para a determinação do PCS em bomba calorimétrica digital, modelo C5000 *Cooling System*, IKA Werke, com princípio de funcionamento adiabático, de acordo com as descrições técnicas da norma NBR8633 (ABNT, 1984).

A quantidade estocada de energia na forma de calor para cada árvore foi obtida em função da biomassa de cada componente (kg), com o respectivo poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹), conforme a seguinte expressão:

$$PE = Biomassa . PCS$$

Em que: *PE* é a produção energética (kcal); *Biomassa* é referente à biomassa de cada componente (kg); *PCS* é o poder calorífico superior para cada componente (kcal.kg⁻¹).

Para o tratamento dos dados o primeiro passo foi verificar a relação entre as variáveis biométricas com a produção energética. Para tanto, foi realizada a análise de correlação de Pearson, seguindo os critérios de Callegari-Jacques (2003), os quais avaliam qualitativamente a intensidade das relações, sendo: correlação nula = 0; correlação fraca = 0 - 0,3; correlação regular = 0,3 - 0,6; correlação forte = 0,6 - 0,9; correlação muito forte = 0,9 - 1,0; correlação plena = 1,0.

Para estimar a produção energética em kcal de cada indivíduo amostrado, foram testados vários modelos matemáticos lineares. As variáveis dendrométricas independentes destes modelos foram *d* (cm) e altura (m), bem como suas combinações. Após serem definidas as variáveis independentes, os seguintes modelos foram ajustados:

- 1) $PE = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
- 2) $PE = \beta_0 + \beta_1 \log d + \beta_2 d^{-1} + \varepsilon$
- 3) $PE = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 dh + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 h + \varepsilon$
- 4) $PE = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 (d^2 h) + \beta_3 (h^2) + \beta_4 (dh^2) + \varepsilon$
- 5) $\ln PE = \beta_0 + \beta_1 (\ln d) + \beta_2 (\ln d)^2 + \beta_3 (\ln h) + \beta_4 (\ln h)^2 + \varepsilon$

Em que: *PE* é a produção energética (kcal); *d* é o diâmetro à 1,30m de altura (cm); *h* é a altura total (m); β_0, \dots, β_5 são os parâmetros dos modelos; *ln* é o logaritmo neperiano; ε é o erro aleatório; *log* é o logaritmo na base 10.

O processamento e a análise estatística dos dados foi realizado no software *Excel*.

Os critérios utilizados para a escolha do melhor modelo para cada variável analisada (PE do fuste, PE da copa e PE total) foram: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajustado}$), erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e distribuição gráfica dos valores residuais. O modelo 5, não linear, foi linearizado utilizando a transformação logarítmica. Para corrigir esta discrepância logarítmica na estimativa da variável dependente foi aplicado um fator de correção:

$$f = e^{(0,5QMR)}$$

Em que: *f* é o fator de correção para a discrepância logarítmica; *e* é o exponencial; *QMR* é o quadrado médio do resíduo da equação logarítmica.

Após este procedimento, foi obtido o valor estimado corrigido da variável dependente analisada. De posse destes novos valores, foram recalculados a soma de quadrados dos resíduos ($SQ_{Resíduo_{recalculada}}$) e a soma de quadrados da regressão ($SQ_{Regressão_{recalculada}}$), para obtenção dos valores corrigidos de R^2 e $Syx\%$, dados por:

$$R^2 = \frac{SQ_{Regressão_{recalculada}}}{SQ_{Total}}$$

$$S_{yx}\% = \frac{\frac{\sqrt{SQ_{Resíduo_{recalculada}}}}{n-k-1}}{\bar{Y}}$$

Em que: SQ_{Total} é a soma de quadrados total; n é o número de observações; k é o número de variáveis independentes; \bar{Y} é a média da variável dependente.

RESULTADOS

Os valores médios dos dados utilizados no presente trabalho podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios dos dados dos indivíduos amostrados em povoamentos de acácia negra no Rio Grande do Sul.

Table 1. Mean values of data from individuals sampled in black wattle stands in Rio Grande do Sul.

Local	d (cm)	Altura (m)	PCS copa kcal.kg ⁻¹	PCS fuste kcal.kg ⁻¹	Biomassa copa (kg)	Biomassa fuste (kg)	PE copa (Mcal)	PE fuste (Mcal)	PE total
Cristal	12,51	15,9	4874	4539	12,31	71,88	59,99	329,90	389,89
Encruzilhada	11,89	15,6	4735	4435	8,31	53,77	39,46	239,21	278,67
Piratini	13,74	14,8	4655	4500	23,75	93,27	110,99	418,59	529,59
Média	12,71	15,4	4755	4491	14,79	72,97	70,15	329,23	399,38

Legenda: d = diâmetro à altura do peito (cm); Altura (m); Biomassa (kg); PCS = poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); PE = produção energética (Mcal).

Como pode-se observar, a PE da copa variou de 39,46 a 110,99 Mcal, já a PE do fuste variou de 239,21 a 418,59 Mcal, enquanto a PE total variou de 278,67 a 529,59 Mcal. Ambos os valores superiores e inferiores foram encontrados em Piratini e Encruzilhada, respectivamente. Os valores médios encontrados no município de Cristal foram os que mais se aproximaram com a média entre as três localidades. Os valores médios referentes à biomassa da copa e do fuste mantiveram a mesma tendência, sendo os maiores valores (23,75 e 93,27 kg, respectivamente) encontrados em Piratini e os menores valores (8,31 e 53,77 kg, respectivamente) encontrados no município de Encruzilhada. O poder calorífico superior apresentou valores muito próximos com a literatura. Silva *et al.* (2012) encontraram valores médios de 4.482 kcal.kg⁻¹ para o fuste de *Acacia mearnsii* um ano após o plantio, de 12 árvores submetidas ao espaçamento de 3 x 1,5m, valor superior ao encontrado por Kannegiesser (1990) de 3.744 kcal.kg⁻¹.

Através da análise de correlação linear simples, detectou-se que as variáveis biométricas diâmetro à altura do peito (d) e altura total (h) foram as variáveis de maior correlação com a produção energética (PE), denotando relações fortes (Tabela 2).

Tabela 2. Correlação das variáveis biométricas com a produção energética de indivíduos amostrados em povoamentos de acácia negra no Rio Grande do Sul.

Table 2. Correlation of the biometric variables with the energy production of individuals sampled in black wattle stands in Rio Grande do Sul.

Variáveis	d	Altura	Biomassa fuste	ME fuste	PCS fuste	PE fuste	Diâmetro copa	Comp. Copa	Biomassa copa	ME copa	PCS copa	PE copa	PE total
d (cm)	1,00												
Altura (m)	0,83	1,00											
Biomassa fuste (kg)	0,95	0,81	1,00										
ME fuste (kg/m ³)	0,21	0,38	0,22	1,00									
PCS fuste (kcal/kg)	0,19	0,08	0,17	0,17	1,00								
PE fuste (kcal)	0,95	0,81	1,00	0,23	0,24	1,00							
Diâmetro copa (m)	0,54	0,41	0,49	0,21	0,27	0,52	1,00						
Comp. Copa (m)	0,30	0,37	0,27	0,15	-0,02	0,26	0,23	1,00					
Biomassa copa (kg)	0,86	0,67	0,92	0,16	0,16	0,91	0,54	0,30	1,00				
ME copa (kg/m ³)	0,37	0,35	0,30	0,38	0,13	0,31	0,22	0,29	0,29	1,00			
PCS copa (kcal/kg)	-0,02	0,03	-0,01	0,02	0,19	0,00	-0,19	0,14	-0,07	0,07	1,00		
PE copa (kcal)	0,86	0,67	0,92	0,16	0,16	0,91	0,53	0,30	1,00	0,28	-0,04	1,00	
PE total (kcal)	0,95	0,79	0,99	0,22	0,22	1,00	0,53	0,27	0,95	0,31	-0,01	0,95	1,00

Legenda: d = diâmetro à altura do peito (cm); Altura (m); Biomassa (kg); ME = massa específica (g.cm⁻³); PCS = poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); PE = produção energética (kcal); Diâmetro de Copa (m); Comprimento de Copa (m).

As estimativas para a produção energética foram definidas a partir de modelos matemáticos lineares, em que a aplicação destes modelos com inclusão de 2 variáveis independentes, sendo combinadas, tende a

proporcionar um melhor ajuste à base de dados, principalmente quando a equação se constitui de variáveis independentes altamente correlacionadas com a variável dependente observada.

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste das equações foram: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa (S_{yx} %) e análise da distribuição dos valores residuais em relação à variável estimada. Os coeficientes ajustados, bem como os parâmetros estatísticos utilizados para a avaliação dos modelos podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes e parâmetros estatísticos das equações utilizadas para estimar a produção energética.
Table 3. Coefficients and statistical parameters of the equations used to estimate energy production.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	$S_{yx}(\%)$
PE do FUSTE								
1	-6980,21	-5767,81	2294,232				0,9487	16,13
2	-4143754	3403760	8971098				0,9138	20,89
3	102203,3	-17546,7	663,0825	1652,078	39,54523	-9152,76	0,9663	13,30
4	2836,081	428,2795	51,05873	-201,245	38,60073		0,9661	13,26
5	7,054508	1,979955	-0,02064	-0,68322	0,318952		0,9766	13,48
PE da COPA								
1	85468,08	-19661,6	1317,177				0,8729	36,38
2	-1374851	1077970	3162990				0,7531	50,70
3	-150065	35856,39	-1734,71	-2625,05	148,4076	10817,33	0,9023	32,44
4	9472,86	-840,448	114,902	268,0524	-59,1166		0,9005	32,56
5	11,72438	1,124496	0,33769	-5,04019	1,033334		0,8772	33,24
PE TOTAL								
1	78487,87	-25429,4	3611,41				0,9537	16,23
2	-5518606	4481730	12134087				0,9012	23,69
3	-47861,4	18309,67	-1071,63	-972,973	187,9528	1664,572	0,9709	13,09
4	12308,94	-412,169	165,9608	66,80763	-20,5159		0,9709	13,01
5	7,307967	1,60312	0,081714	-0,45095	0,262723		0,9796	13,10

Legenda: β_0, \dots, β_5 = os coeficientes dos modelos; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}(\%)$ = erro padrão da estimativa em porcentagem.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se determinar os melhores modelos para cada componente (fuste, copa e total), sendo estes: modelo 5 para PE do fuste, modelo 3 para PE da copa e modelo 5 para PE total. As análises de distribuição de resíduos dos modelos ajustados podem ser verificadas nas Figuras 1 e 2.

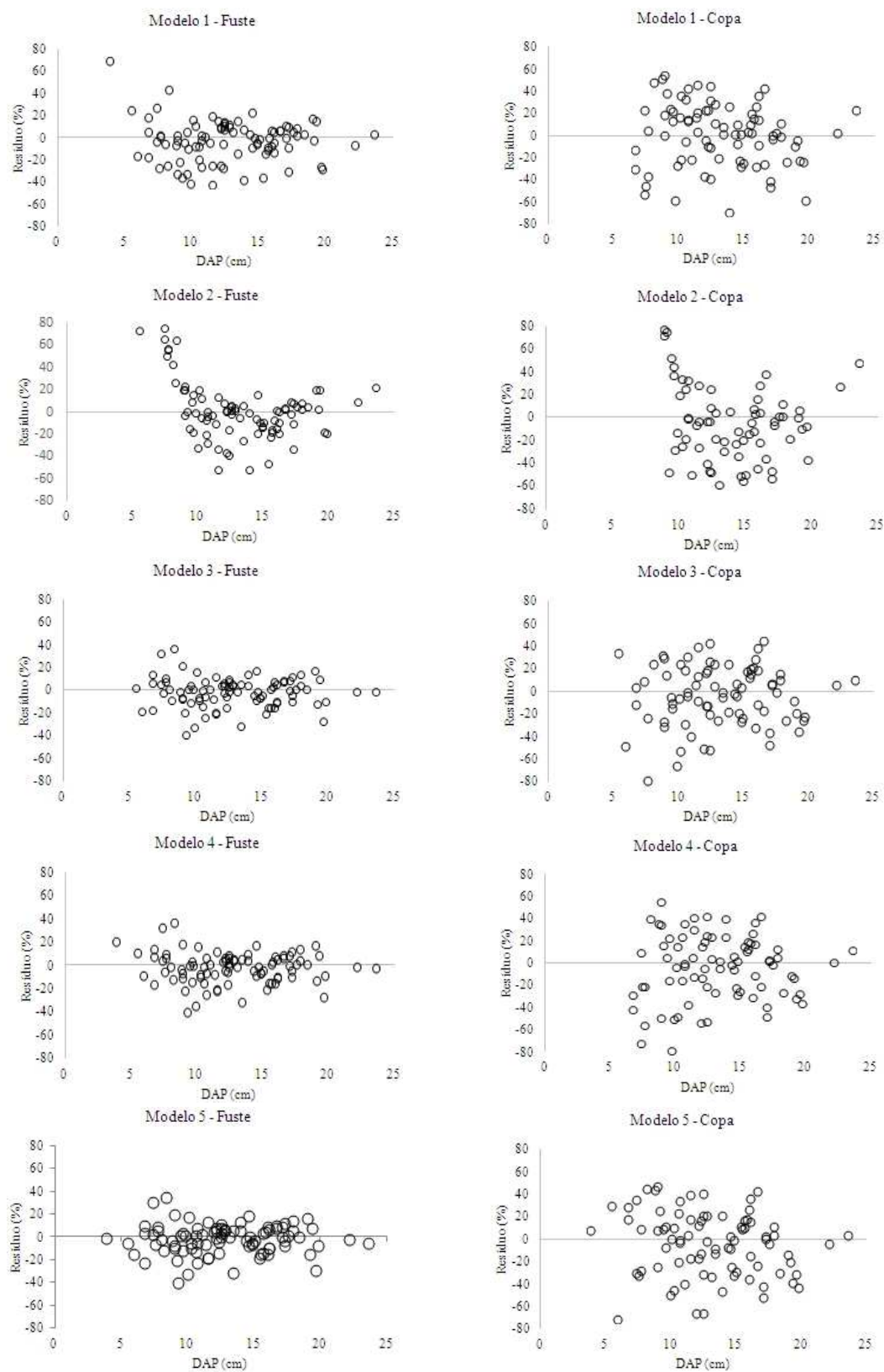


Figura 1. Gráfico de dispersão dos resíduos das equações testadas para estimar a PE do fuste e da copa.
 Figure 1. Dispersion graph of the residuals of the equations tested to estimate the PE of the stem and crown.

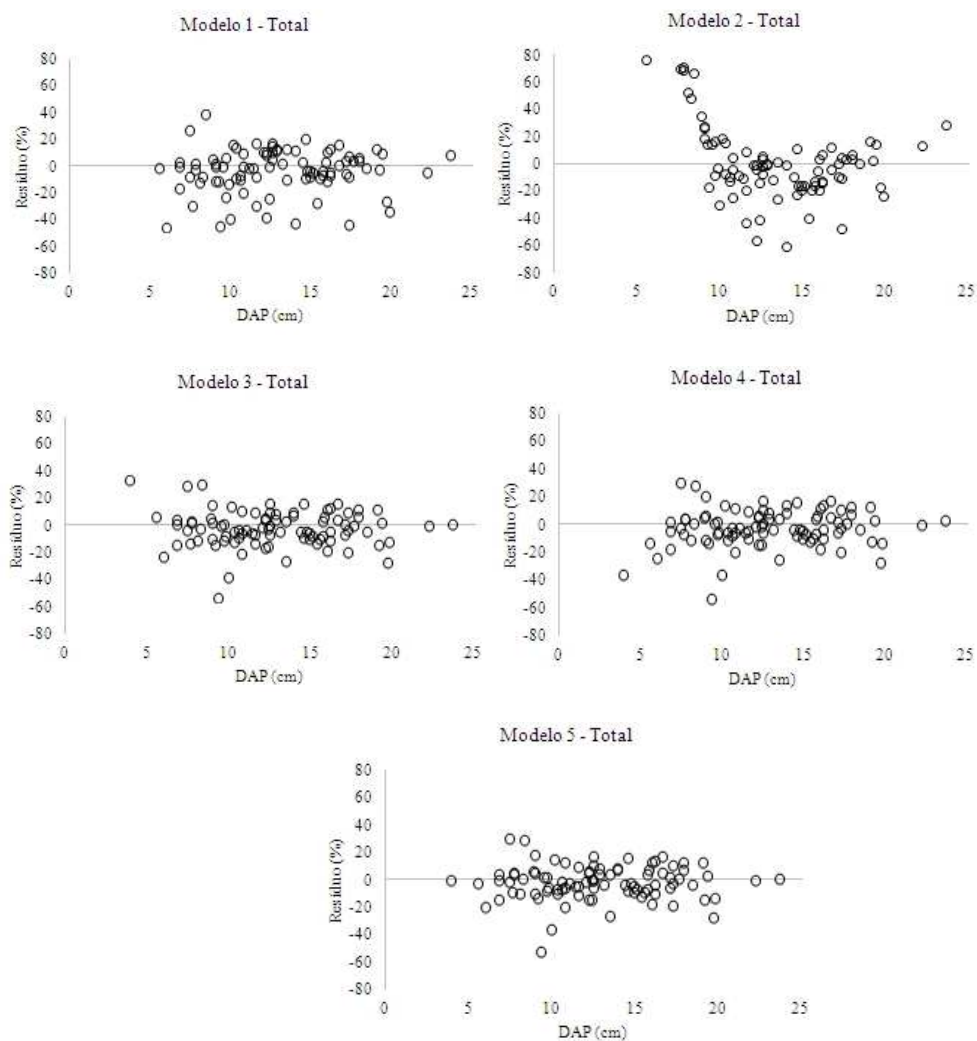


Figura 2. Gráfico de dispersão dos resíduos das equações testadas para estimar a PE total.
 Figure 2. Scatter plot of the residuals of the equations tested to estimate the total PE.

As árvores amostradas nas parcelas do presente trabalho foram caracterizadas pelos seguintes parâmetros populacionais: idade, d médio, altura média total, produção energética da copa por hectare, produção energética do fuste por hectare, produção energética total por hectare, percentual de árvores falhas e mortas (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativa dos parâmetros populacionais avaliados nas parcelas de estudo.
 Table 4. Estimation of the population parameters evaluated in the study plots.

Local	Idade	d (cm)	Altura (m)	PE copa (Gcal.ha ⁻¹)	PE fuste (Gcal.ha ⁻¹)	PE total (Gcal.ha ⁻¹)
Cristal	10,08	12,51	15,9	111,72	558,96	672,25
Encruzilhada	10,75	11,89	15,6	102,39	522,62	627,11
Piratini	9,83	13,74	14,8	114,38	521,89	645,62

DISCUSSÃO

As equações ajustadas para PE do fuste e PE total apresentaram medidas de precisão semelhantes. O coeficiente de determinação variou de 0,9012 a 0,9796 e erro percentual de 13,01% a 23,69%. Já as equações

ajustadas para PE da copa apresentaram menor coeficiente de determinação (0,7531 a 0,9023) e maior erro percentual, variando de 32,44% a 50,70% (Tabela 2).

Santana (2009) obteve coeficiente de determinação de 0,9938 e um erro padrão da estimativa percentual de 5,33% ao ajustar o modelo $PE = \beta_0 + \beta_1 * I + \beta_2 * d + \beta_3 * h + \beta_4 * I * d + \beta_5 * d * h$ (em que: I é a idade) para estimar a produção energética da madeira em 26 árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, aos 7 anos de idade.

As equações 3, 4 e 5 apresentaram as melhores medidas de precisão quando foram comparadas às outras equações. As equações 1 e 2, que utilizam apenas o diâmetro como variável independente, apresentaram piores medidas de dispersão quando comparadas às equações que utilizam também a altura total como variável independente. A equação 4, apesar de ter apresentado menor erro percentual que o encontrado pelas equações 3 e 5, apresentou um coeficiente de determinação menor quando comparado com as mesmas. Desta forma, baseado nas análises comparativas, selecionou-se a equação 3 para estimar a PE de copa e a equação 5 para estimar PE de fuste e PE total.

A equação 5, ajustada para a produção energética total e do fuste, foi a que apresentou melhor distribuição dos resíduos (Figuras 1 e 2), portanto, selecionada para estimar os valores dessas variáveis.

A partir das equações selecionadas foram estimados os valores, por hectare, das variáveis PE da copa, PE do fuste e PE total (Tabela 3), tomando como base dados provenientes de um inventário com 4 parcelas na região de Cristal, 4 parcelas na região de Encruzilhada e 4 parcelas na região de Piratini, ambas no Rio Grande do Sul. Verificou-se que a produção energética média da copa foi de 111,72 Gcal.ha⁻¹ em Cristal, 102,39 Gcal.ha⁻¹ em Encruzilhada e 114,38 Gcal.ha⁻¹ em Piratini. Com relação à variável PE do fuste, os valores médios encontrados foram: 558,96 Gcal.ha⁻¹ em Cristal, 522,62 Gcal.ha⁻¹ em Encruzilhada e 521,89 Gcal.ha⁻¹ em Piratini. Em relação à produção energética total média, os valores obtidos foram de 672,25 Gcal.ha⁻¹ em Cristal, 627,11 Gcal.ha⁻¹ em Encruzilhada e 645,62 Gcal.ha⁻¹ em Piratini.

A análise da produtividade energética por unidade de área permite uma melhor visualização do potencial energético da cultura. Dessa forma, Lima *et al.* (2011) em seus trabalhos no município de Guarapuava-PR, com a espécie *Eucalyptus benthamii* disposta no espaçamento 3 x 2 m, relata uma produtividade energética estimada de 1.940 Gcal.ha⁻¹ aos 6 anos. Já Brito *et al.* (1983) estimando o potencial energético de oito espécies de eucalipto, observaram uma produtividade energética que variou de 300 Gcal.ha⁻¹ para o *Eucalyptus gummifera* até 2.500 Gcal.ha⁻¹ para o *Eucalyptus pilularis*. No mesmo sentido, Eloy (2013) relatou uma produção energética para a espécie *Eucalyptus grandis* na ordem de 387,66 Gcal.ha⁻¹ e para a espécie *Acacia mearnsii* na ordem de 192,69 Gcal.ha⁻¹, ambas no menor espaçamento de plantio (2 x 1 m), aos 3 anos de idade.

Santana (2009) obteve produtividade energética de 594,99 Gcal.ha⁻¹ ao estimar os parâmetros populacionais avaliados nas parcelas de estudo em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, aos 7 anos de idade com espaçamento de 3 x 2,5 m. No mesmo sentido, Brito & Barrichello (1980) apresentaram valores de produção energética de 662 Gcal.ha⁻¹ para *Eucalyptus citriodora* e 1.259 Gcal.ha⁻¹ para *Eucalyptus saligna*, ambos aos 3 anos de idade. Da mesma forma, Cintra (2009) trabalhando com o potencial energético de 12 espécies florestais nativas da região de Assis-SP, com idades de 6 a 8 anos, em espaçamento de 3 x 2 m, encontrou valores de produtividade energética variando de 67,4 a 1.021,2 Gcal.ha⁻¹.

CONCLUSÕES

As análises realizadas permitem concluir que:

- O modelo 5, por apresentar maior coeficiente de determinação, menor erro padrão da estimativa e melhor distribuição gráfica dos resíduos, foi o melhor para estimar a produção ou estoque energético tanto para o fuste quanto para o total do conjunto de árvores amostradas.
- O modelo 3, comparado às outras equações ajustadas, foi o melhor para estimar a produção ou estoque energético para o componente copa.
- O uso de equações de regressão na estimativa da produção energética das árvores individuais pode ser aplicado, visto que ótimos índices de ajuste foram obtidos para o presente estudo com o uso de regressão linear múltipla.

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Ana Paula Dalla Corte, pela orientação, ao mestrando Sérgio Costa, cuja dedicação na transmissão de seus conhecimentos foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho, ao professor Dr. Dimas Agostinho da Silva por ceder espaço no Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Paraná (UFPR) para análise dos dados e aos demais professores, bolsistas, voluntários e amigos do Centro de

Excelência em Pesquisas de Fixação de Carbono na Biomassa (BIOFIX) que de alguma forma contribuíram para a coleta de dados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: Determinação da densidade básica da madeira**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: carvão vegetal: Determinação do poder calorífico superior**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BEHLING, A. 2016. **Modelagem da biomassa de árvores para assegurar aditividade dos seus componentes**. 117 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guidetechnique de lacarbonisation: lafabrication de charbon de bois**. Aix-en-Provence: ÉDISUD, 1985. 178 p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. 1980. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2 - Densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 121-126.

CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAVICK, L. F. 2002. Exportação de nutrientes em função do tipo de exploração em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. **Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 97-104.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. 2003. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: ArtMed. p. 165-184.

CINTRA, T. C. 2009. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

ELOY, E. 2013. **Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação**. 88f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FREDDO, A. 1997. **Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia-negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2016: ano base 2015**. São Paulo: Ibá, 2016. 100 p.

KANNEGIESSER, U. 1990. Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciencia e Investigación Forestal**, Concepción, v. 4, n. 2, p. 198-212.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. 2011. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17.

MULLER, A. G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; RADIN, B.; FRANÇA, S.; SILVA, M. I. G. 2005. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 65-71.

OLIVEIRA, H. A. 1968. **Acácia-negra e tanino no Rio Grande do Sul**. Canoas: La Salle. 121 p.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. 2012. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Rome e Montpellier: Food and Agricultural Organization of the Unites Nations and Centre de Cooperation Internationaleen Recherche Agronomique pour le Développement. 215p.

RESENDE, M. D. V. de; HIGA, A. R.; HELLER, J. B.; STEIN, P. P. 1992. Parâmetros genéticos e interação genótipo x ambiente em teste de procedências e progênies de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Boletim Pesquisa Florestal**, Colombo. n. 24/25, p. 55-65.

SANTANA, W. M. S. 2009. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, D. A.; CARON, B. O.; BEHLING, A.; SOUZA, V. Q.; ELOY, E. 2012. Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 42, n. 9, p. 1588-1595.

SBS. **Fatos e Números do Brasil Florestal**. 2008. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Disponível em: <www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>. Acesso em: out. 2016.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. 2013. **Florestas do Brasil em resumo: dados de 2007 - 2012**. Brasília: SFB, 188 p.