

Ajuste de modelos matemáticos lineares e não lineares para estimativa de biomassa e nutrientes de *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* no semiárido pernambucano

Setting linear and nonlinear mathematical models for biomass estimate and nutrients in *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* in the semiarid region of Pernambuco

Jadson Coelho de Abreu¹, José Antônio Aleixo da Silva²,
Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira² e Francisco Tarcísio Alves Junior³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi testar diferentes modelos matemáticos para estimar a biomassa e nutrientes das partes aéreas baseados em variáveis dendrométricas de *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* (Griseb.) Altschu no semiárido pernambucano e selecionar a melhor equação com base nos critérios estatísticos: índice de ajuste, erro padrão da estimativa e distribuição gráfica dos resíduos. Foram selecionados 20 indivíduos para biomassa e 10 para os nutrientes. Foram testados diferentes modelos matemáticos com a finalidade de estimar as quantidades de biomassa e nutrientes utilizando como variável dependente o peso de biomassa em kg e o teor de nutrientes (N, P, K, Ca, S, Mg), e como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (1,3 m), as alturas total (HT) e comercial (HC) das árvores. Para biomassa e nutrientes total as equações apresentaram ajustes satisfatórios, porém por compartimento das árvores não foi possível se obter boas equações para alguns nutrientes (P, K, Mg), a acurácia dos ajustes foi boa para os demais nutrientes (N, Ca, S) e biomassa verde.

Palavras-chave: Caatinga, Equações de biomassa, Índice de Ajuste.

Abstract

The objective of this study was to test different mathematical models to estimate the biomass and nutrient contents from the aerial parts based on the dendrometric variables of *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* (Griseb.) Altschu from semiarid Pernambuco and select the best equation based on statistical criteria of adjustment index, standard error of estimation and graphic distribution of residues. 20 individuals were selected for biomass and 10 for nutrients. Different mathematical models were tested in order to estimate quantities of biomass and nutrients, using as the dependent variable biomass weight in kg of nutrients (N, P, K, Ca, S, Mg); and as independent variables the diameter at breast height (1.3 m); the overall height (HT) and commercial (HC) trees. For biomass and overall nutrient the equations showed good fits; however per compartment of the trees it was not possible to get good equations for some nutrients (P, K, Mg). The accuracy of the adjustments was good for the other nutrients (N, Ca, S) and green biomass.

Keywords: Caatinga, biomass equations, setting Index.

INTRODUÇÃO

Em regiões onde as condições de umidade são intermediárias entre aridez de um lado e a floresta sazonal ou pluvial do outro, encontra-se as Caatingas, que são formações florestais de vegetação espinhosa. A Caatinga contém pequenas árvores latifoliadas, em diversos casos contorcidas e espinhosas. As folhas caem durante as estações secas; os espinheiros podem cobrir densamente uma área e ocorrer em padrão espalhado ou agrupado (GOMES; VARRIALE, 2004).

Quase 40% da área original da Caatinga é recoberta de vegetação nativa. A maior parte dessa vegetação é usada para produção de lenha, seja como finalidade principal, seja como produto da abertura de áreas para plantio no sistema de agricultura itinerante. Outra parte é usada como pastagem nativa, com os animais consumindo a vegetação herbácea presente na época de chuvas e as folhas de árvores e de arbustos que caem ao longo da estação seca (SCHACHT et al., 1989).

¹Professor Assistente do Colegiado de Engenharia Florestal. UEAP - Universidade do Estado do Amapá. Avenida Presidente Vargas - 68906970 - Macapá, AP, Brasil. E-mail: jadson.abreu@ueap.edu.br.

²Professor Titular do Departamento de Ciência Florestal. UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros - 52171-900 - Recife, PE, Brasil. E-mail: jaaleixo@uol.com.br; rinaldo@dcfl.ufrpe.br.

³Professor Adjunto do Colegiado de Engenharia de Produção. UEAP - Universidade do Estado do Amapá. Avenida Presidente Vargas - 68906970 - Macapá, AP, Brasil. E-mail: tarcisioalvesjr@yahoo.com.br.

Entre as principais espécies que compõe a Caatinga está a *Anadenanthera colubrina*, conhecida popularmente como angico é uma espécie da família Fabaceae, vastamente distribuída no Brasil. Apresenta crescimento acelerado, podendo chegar à 20 m de altura, fazendo dela uma espécie com potencial para reflorestamento de áreas degradadas e restauração de matas ciliares (CARVALHO, 1994).

Além disto, é uma espécie bastante utilizada na produção de cercas e mourões, marcenaria, sua casca é utilizada para fins medicinais, e possui tanino usado em indústrias de curtimento de couro (MAIA, 2012). Porém, o seu uso se destaca quanto ao potencial energético (carvão vegetal e lenha) para a indústria e consumo doméstico no Semiárido nordestino, uma vez que esta espécie produz chamas intensas e de longa duração (FERRAZ et al., 2006).

Sendo assim, as estimativas de biomassa florestal expressam informações imprescindíveis nas questões ligadas, entre outras, às áreas de manejo florestal e de clima. No manejo a biomassa está relacionada com os estoques de macro e micronutrientes da vegetação, que são obtidos pelo produto da massa pelas concentrações de cada mineral. No caso do clima, a biomassa é usada para estimar os estoques de carbono, que, por sua vez, são utilizados para estimar a quantidade de CO₂ que é liberada à atmosfera durante um processo de queimada (HIGUCHI et al. 1998).

A obtenção do peso individual de árvores, para fazer as estimativas da retirada de nutrientes devido à colheita florestal, é de total importância para estimar a necessidade de reposição de nutrientes retirados e para a orientação no manejo florestal, visando à sustentabilidade da produção (SILVA et al., 2004).

O conhecimento da distribuição da biomassa e dos nutrientes nos diferentes compartimentos e fases de desenvolvimento dos povoamentos florestais é indispensável para definição do manejo mais adequado, principalmente no que diz respeito a práticas que visam à manutenção da produtividade, tais como: definição da idade e intensidade de colheita, manejo dos resíduos florestais, adubação de reposição, preparo de solo, entre outras (WITSCHORECK, 2008).

O interesse pela quantificação da biomassa florestal e nutrientes vem crescendo muito nos últimos anos, sendo esse crescimento relacionado diretamente ao potencial que as florestas tem em acumular carbono atmosférico na sua biomassa. A biomassa florestal pode ser avaliada diretamente, por meio de inventário, ou pelo uso de modelos volumétricos de predição (VISMARA, 2009).

A análise de regressão é uma ferramenta estatística que explora a relação entre variáveis quantitativas ou qualitativas (MORALES, 2006). A regressão é a ferramenta utilizada para a construção de equações a partir de modelos matemáticos. É uma das técnicas estatísticas que permite analisar a relação existente entre duas ou mais variáveis e tem como objetivo estimar a variável de difícil mensuração em função da(s) variável(is) de fácil mensuração (SANQUETTA et al., 2009). Os diversos modelos regressão encontrados na literatura podem ser divididos em dois grupos: modelos lineares e modelos não lineares, sendo que estes subdividem-se em intrinsecamente lineares e os intrinsecamente não lineares. (BATISTA; COUTO, 1986; GOMES; VARRIALE, 2004).

Sendo assim o objetivo deste trabalho foi testar diferentes modelos matemáticos, para estimar a biomassa e nutrientes das partes aéreas de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE em função das variáveis dendrométricas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O presente estudo foi realizado em uma área com cerca de 50 ha (8° 30' 37" S e 37° 59' 07" W) com vegetação de Caatinga na Fazenda Itapemirim, com extensão de aproximadamente 6.000 ha, na mesorregião do São Francisco pernambucano. O município de Floresta é banhado pela bacia hidrográfica do Rio Pajeú e seu clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, semiárido quente, apresentando precipitação média anual de aproximadamente 503 mm, com período chuvoso de janeiro a abril, e temperatura média anual de 26,1 °C. O município possui uma área de 3.643,97 Km² e uma altitude média de 323 m (ALVES JR. et al., 2013).

Quantificação da biomassa e Nutrientes

A análise da quantificação da biomassa da parte aérea foi realizada com base na estrutura diamétrica encontrada no inventário florestal na área avaliada. Os indivíduos de *Anadenanthera colubrina* foram divididos em cinco classes de circunferência com amplitude de 3 cm, a partir da circunferência a 1,30 m de altura do solo (cap) de 6 cm.

No inventário realizado na área foram abatidas quatro árvores representativas da circunferência média de cada classe, para análise da produção de biomassa da parte aérea, sendo 20 indivíduos no total.

A escolha dos indivíduos foi feita de forma aleatória, evitando-se plantas parcialmente cortadas, queimadas ou tombadas e de forma a cobrir a classe de diâmetro previsto. Cada planta escolhida teve mensurada a cap. o qual foi convertido em diâmetros à 1,30 m de altura do solo (dap). Posteriormente, as árvores foram cortadas e tiveram altura total (HT) e a altura do tronco comercial (HC) medidos. Após o processo de mensuração das variáveis dendrométricas foi feita a separação dos compartimentos das árvores em fuste, galhos e folhas. Para a análises dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) se utilizou 10 árvores para serem analisadas no laboratório de bioquímica vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Ajuste dos modelos

Com a obtenção dos dados de biomassa verde para 20 árvores e de 10 árvores para nutrientes procedeu-se o ajuste dos modelos matemáticos, os modelos utilizados são lineares e não lineares. Sendo que foram testados 20 modelos (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos matemáticos para ajuste de equações de biomassa e nutrientes para *Anadenanthera colubrina* no semiárido pernambucano.

Table 1. Mathematical models for adjustment of biomass and nutrients equations for *Anadenanthera colubrina* in semiárido Pernambuco.

Modelo	Nome do modelo
1 $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i^2 + \beta_2 H_i^2 + \beta_3 (DAP_i^2 HC_i) + \varepsilon_i$	
2 $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 HC_i + \varepsilon_i$	
3 $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 (DAP_i^2 HC_i) + \varepsilon_i$	
4 $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 DAP_i^2 + \beta_3 (DAP_i^2 HC_i) + \varepsilon_i$	
5 $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i^2 + \beta_2 (DAP_i^2 HC_i) + \varepsilon_i$	
6 $\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP_i^2 HC_i) + \ln \varepsilon_i$	Spurr
7 $\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP_i^3) + \ln \varepsilon_i$	
8 $Y_i = \beta_0 DAP_i^{\beta_1} \cdot HC_i^{\beta_2} \cdot \varepsilon_i$	Schumacher e Hall
9 $\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln HC_i + \ln \varepsilon_i$	
10 $\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP_i^2) + \ln \varepsilon_i$	
11 $Y_i = e^{\beta_0 + \beta_1 \ln DAP_i + \beta_2 \ln HC_i^2} \cdot \varepsilon_i$	
12 $Y_i = \beta_0 e^{\left[\frac{DAP_i - \beta_1}{\beta_2}\right]} + \varepsilon_i$	Log-Normal
13 $Y_i = \beta_0 e^{\left[\frac{HC_i - \beta_1}{\beta_2}\right]} + \varepsilon_i$	Log-Normal
14 $Y_i = \beta_0 e^{[\beta_1 (\beta_2 DAP_i^2 + \beta_3 HC_i)]} + \varepsilon_i$	Silva e Bailey
15 $Y_i = \beta_0 - \beta_1 e^{(-\beta_2 DAP_i^{\beta_3})} + \varepsilon_i$	Weibull
16 $Y_i = \beta_0 - \beta_1 e^{(-\beta_2 HC_i^{\beta_3})} + \varepsilon_i$	Weibull
17 $Y_i = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 DAP_i)}]^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Chapman-Richards
18 $Y_i = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 HC_i)}]^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Chapman-Richards
19 $Y_i = \frac{\beta_0}{[1 + \beta_1 \cdot e^{(-\beta_2 DAP_i)}]} + \varepsilon_i$	Logístico
20 $Y_i = \frac{\beta_0}{[1 + \beta_1 \cdot e^{(-\beta_2 HC_i)}]} + \varepsilon_i$	Logístico

Em que: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ = parâmetros dos modelos; DAP = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; \ln = logaritmo natural; H = altura total e comercial, Y_i = peso verde da biomassa, e ε_i = erro aleatório. Where: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ = parameter models; DBH = diameter at breast height (1.3 m) of the tree; \ln = natural logarithm; H = total and commercial height, Y_i = fresh weight of biomass, and ε_i = random error.

Seleção da Melhor Equação

A seleção das melhores equações para estimativas da biomassa e de nutrientes foi realizada com base nos seguintes critérios estatísticos; (IAaj) Índice de ajuste ajustado (SCHALAEGL, 1981), esse método foi desenvolvido para os modelos não lineares intrinsecamente não lineares, para os modelos lineares e não lineares intrinsecamente lineares o Índice de ajuste é igual ao coeficiente de determinação (R^2).

Além do índice de ajuste ajustado foi utilizado o Erro padrão da estimativa $S_{xy}(\%)$, para os modelos logarítmicos foi usado o fator de correção da discrepância logarítmica, esse proposto por Meyer (1943). Calculado o fator de correção para a discrepância logarítmica, esse é multiplicado a equação resultante, assim será obtido o valor estimado corrigido da variável dependente analisada. De posse desses 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 IAaj e $S_{xy}\%$ das equações (RESENDE et al., 2006). Para verificar os desvios dos dados estimados com relação aos dados observados foi utilizada a distribuição gráfica dos resíduos em porcentagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o ajuste dos 20 modelos para biomassa, N, P, K, S, Ca, Mg, para árvore total, fuste, galhos e folhas, foram criadas 560 equações, porém algumas não obtiveram resultados satisfatórios, sendo assim, considerou-se apenas as duas melhores equações que apresentaram maiores valores de IAaj para cada situação. A seguir são apresentados resultados das melhores equações para biomassa total, biomassa do fuste, biomassa nas folhas e galhos (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas de biomassa verde total, fuste, folhas e galhos para as *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 2. Estimates of parameters and precision measurements of selected equations adjusted total green biomass, stem, leaves and branches for *Anadenanthera colubrina* in Floresta -PE.

Biomassa total						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
17	54,92921	0,178713	2,490494		91,99	16,68
19	51,63157	16,05867	0,362138		93,45	15,08
Biomassa do Fuste						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
15	5,462067	-19,2479	3274,907	-4,01542	89,29	20,48
19	24,9822	18,05488	0,369333		89,43	20,35
Biomassa de folhas						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
15	3,99122	2,497061	0,000204	4,395654	83,13	14,99
19	4,093603	10,7737	0,514011		82,24	15,38
Biomassa de Galhos						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
15	22,41047	19,85345	0,002569	2,575889	91,2	19,22
19	22,74502	18,10931	0,353235		91,62	18,76

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj= índice de ajuste ajustado e Sxy= erro padrão da estimativa. Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

Para biomassa total as melhores equações foram as equações 17 de Chapman e Richard e a 19 Logística. Para nitrogênio no fuste, folhas e galhos os melhores resultados foram da equação 15 de Weibull e novamente a equação 19 Logísticas que apresentou uma boa aderência aos dados de biomassa.

A equação 19 (logística) só não foi a melhor no ajuste para biomassa das folhas, pois apresentou estatísticas muito próximas da equação 15 de Weibull, porém pela análise gráfica dos resíduos a equação 19 tem uma maior variação dos desvios quando comparada com a equação 15, no entanto, para as demais situações a equação logística foi a melhor equação para biomassa total, do fuste e dos galhos, pois apesar de apresentar distribuições um pouco melhor que a equação 15, ainda apresentou as melhores estatísticas (Figura 1).

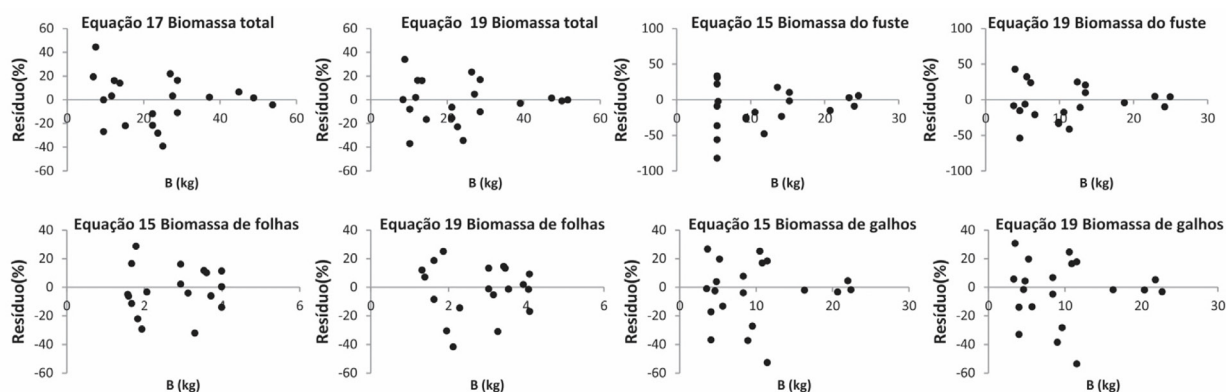


Figura 1. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para biomassa verde total, fuste, folhas e galhos de *Anadenanthera colubrina* em Florestal-PE.
Figure 1. Graphic Distributions of waste from the equations selected for full green biomass, stem, leaves and branches to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Sampaio et al. (2010) avaliando o peso seco de regeneração de *Mimosa ophtalmocentra* no Sertão pernambucano ajustou o modelo de potência encontrando R^2 de 81%. Já Scolforo et al. (2008) utilizaram o modelo de Schumacher e Hall, em três municípios diferentes no Estado de Minas Gerais em área de Cerrado para estimar a biomassa total de *Anadenanthera colubrina*, encontrou R^2_{aj} para essa mesma espécie variando de 91,93% a 95,37%, sendo que as equações ajustadas para o município de Floresta-PE estão neste intervalo, porém para erro padrão da estimativa as equações ajustadas em Minas Gerais tiveram valores mais altos, variando de 21,24% a 32,33%.

Para nitrogênio a equação que mais se destacou foi a cinco que apresentou as melhores estatísticas para nitrogênio total e nitrogênio nas folhas (Tabela 3).

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas para o nitrogênio total, fuste, folhas e galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 3. Estimates of parameters and selected equations accurately measures adjusted for total nitrogen, stem, leaves and branches to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Nitrogênio total						
Equação	B_0	B_1	B_2	B_3	IAaj (%)	Sxy(%)
1	38,97349	3,48555	-0,11624	-0,16361	86,28	17,80
5	35,81478	3,44182	-0,16838		88,04	16,62
Nitrogênio do fuste						
Equação	B_0	B_1	B_2	B_3	IAaj (%)	Sxy(%)
4	36,37439	-8,18795	1,65271	-0,09272	90,27	18,72
15	99,72195	72,72517	7,15E-13	13,24435	95,44	12,82
Nitrogênio de folhas						
Equação	B_0	B_1	B_2	B_3	IAaj (%)	Sxy(%)
1	16,5999	1,50985	-0,05567	-0,08611	75,82	19,93
5	15,08706	1,4889	-0,08839		78,76	18,68
Nitrogênio de galhos						
Equação	B_0	B_1	B_2	B_3	IAaj (%)	Sxy(%)
7	1,55972	0,33993			77,55	27,81
10	1,55972	0,50989			78,54	25,11

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj = índice de ajuste ajustado e Sxy = erro padrão da estimativa.
 Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

Selecionou-se a equação cinco para o nitrogênio total e para nitrogênio nas folhas, pois mesmo apresentando distribuição dos resíduos semelhante a suas concorrentes, apresentaram melhores estatísticas. A equação 15 de Weibull foi a melhor para biomassa no fuste, pois apresentou a distribuição dos resíduos com menor variação dos erros e a equação 10 foi a melhor para nitrogênio nos galhos (Figura 2).

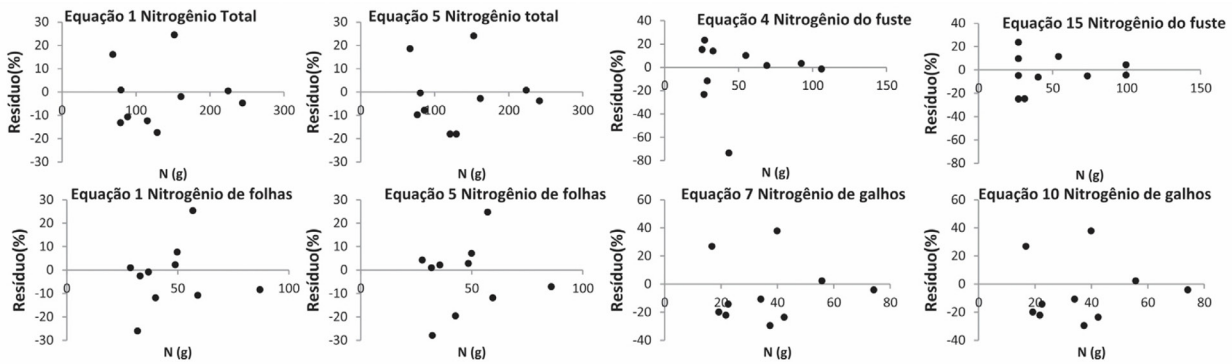


Figura 2. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para nitrogênio total, fuste, folhas e galhos *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Figure 2. Graphic Distributions of waste from the equations selected for total nitrogen, stem, leaves and branches to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Em trabalhos para estimar nitrogênio total, Phillips et al. (1989), ajustaram modelos para principais espécies do litoral Sul dos Estados Unidos e obtiveram equações com precisões variando de 94% a 99% de R^2 . No Brasil, Ribeiro et al. (2012) também testaram modelos para nitrogênio total em povoamento de Bracatinga (*Mimosa scabrella*) em Curitiba, conseguindo uma equação com R^2 aj de 91,6%, valor esse muito próximo das equações selecionadas para nitrogênio do fuste de *Anadenanthera colubrina*.

No ajuste para equações de fósforo só foi possível obter boas equações quando se ajustou fósforo total e fósforo nos galhos, para fósforo no fuste e nas folhas nem uma equação apresentou IAaj igual ou superior a 70% (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas de Fósforo total e galhos para *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 4. Estimation of the parameters and accuracy measurements of selected set of Total phosphorus and branches equations to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Fósforo Total						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	3,6635	3,07058	-0,96596		77,32	22,42
12	3,216711	0,01	1,140942		77,39	22,39
Fosforo de galhos						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	-0,60772	2,56788	-0,87153		80,41	27,82
5	2,57122	0,21101	-0,0074		80,56	27,71

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj = índice de ajuste ajustado e Sxy = erro padrão da estimativa. Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

As equações 2 e 12 (Lognormal) apresentam estatísticas muito próximas e distribuições residuais semelhantes com ligeira vantagem para a equação 12, então pode-se inferir que as duas equações são boas estimadoras para essa espécie, porém a mais indicada é a 12 por ter apenas o DAP para estimar o fósforo total para essa espécie. As equações dois e cinco apresentam distribuições residuais semelhantes com superestimativa dos desvios nas menores concentrações de fósforo, mas a equação cinco apresenta IAaj um pouco melhor assim como menor Sxy, então essa é a equação selecionada para fósforos nos galhos (Figura 3).

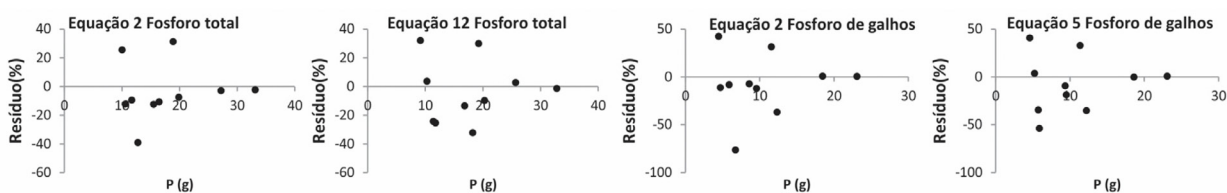


Figura 3. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para Fósforo total e nos galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Figure 3. Graphic Distributions of waste from the equations selected for Total phosphorus and branches of *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE

Para modelagem de fósforo, Rubilar et al. (2005) obtiveram uma equação para *Pinus taeda* com R² de 79% inferior as ajustadas para os galhos. Téo (2009) obteve duas equações para estimar fósforo em galhos finos com R²aj de 63%, as equações para galhos de *Anadenanthera colubrina* obtiveram estatísticas superiores a encontrada por esse autor.

Assim como no ajuste para fósforo, não foi possível gerar boas equações de potássio para todos as partes aéreas de *Anadenanthera colubrina*, pois para fuste e folhas nem uma equação apresentou IAaj maior ou igual a 70% (Tabela 5).

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas de Potássio total e galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 5. Estimates of parameters and accurately measures the selected equations adjusted total potassium and branches of *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Potássio Total						
Equação	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	IAaj (%)	Sxy(%)
2	6,57629	2,84903	-0,8983		91,59	10,73
5	9,8394	0,2796	-0,01115		91,25	10,95
Potássio dos galhos						
Equação	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	IAaj (%)	Sxy(%)
4	9,8954	-2,74148	0,39902	-0,01098	89,81	21,59
15	18,62887	13,84023	1,78E-09	8,556776	91,28	19,98

Em que: b₀, b₁,..., b_n = coeficientes da equação, IAaj= índice de ajuste ajustado e Sxy= erro padrão da estimativa. Where: b₀, b₁,..., b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

As equações dois e cinco apresentam estatísticas muito próximas, porém a dois foi selecionada, que mesmo na presença de um *outliers* nos resíduos, essa, apresenta uma distribuição com tendência de ser homogênea. A equação 15 foi a melhor pra os galhos, pois apresentou IAaj mais alto e Sxy mais baixo e distribuição residual com menor variação dos desvios (Figura 4).

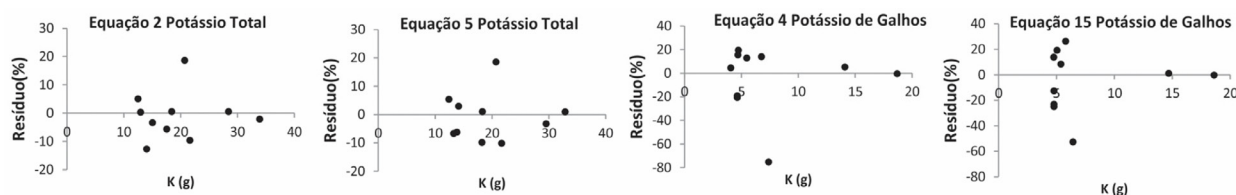


Figura 4. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para Potássio total e nos galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Figure 4. Graphic Distributions of waste from the equations selected for Potassium full and the branches of *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

As equações globais para estimarem potássio total ajustadas por Ratuchne (2010) atingiram no máximo 73% de R²aj, As equações para estimar potássio nos galhos ajustadas por Téo (2009) obtiveram 79,2 % de R²aj e 39,8% de Sxy para galhos finos, esse foi inferior ao ajuste para *Anadenanthera colubrina*.

No ajuste dos modelos para criação de equações para cálcio, a exemplo dos resultados para nitrogênio a equação cinco foi a melhor, porem dessa vez em todas as situações, em cálcio total, cálcio no fuste, cálcio nas folhas e galhos (Tabela 6).

A equação ajustada por Santana et al. (2008) para estimar cálcio total para eucaliptos apresentou R² de 89%, as equações ajustadas por Phillips et al. (1989), variaram para as principais espécies de 91% a 98 % de R², sendo que nem um dos autores considerou o número de parâmetros dos modelos testados apresentando sempre R² e não R²aj, e isto pode estar favorecendo alguns modelos com maiores números de variáveis, mas mesmo assim as equações obtidas neste estudo apresentaram IAaj 89,47% a 92,63% e com Sxy variando de 12,88% a 23,65%, mostrando resultados satisfatórios em comparação com equações de cálcio para outras espécies e formações.

A distribuição dos resíduos apenas confirma que a equação cinco foi a indicada para o cálcio pois, apresenta as melhores estatísticas e em todas as situações tem comportamento da distribuição dos desvios melhores que suas concorrentes (Figura 5).

Tabela 6. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas para o cálcio total, fuste, folhas e galhos para *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 6. Estimates of parameters and selected equations accurately measures adjusted for total calcium, stem, leaves and twigs to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Cálcio total						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	-34,46957	38,1813	-11,70388		91,98	19,53
5	12,86932	3,60801	-0,13802		92,63	18,72
Cálcio do fuste						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	-7,0227	4,09716	-1,6411		90,79	22,52
5	0,90864	0,36848	-0,0233		91,13	22,09
Cálcio nas folhas						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
5	7,9698	0,76773	-0,03754		92,56	12,88
8	1,73535	1,80425	-0,89903		91,88	18,59
Cálcio nos galhos						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
4	36,438	-11,49313	3,63273	-0,12238	89,47	24,75
5	4,29589	2,3988	-0,08343		90,39	23,65

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj= índice de ajuste ajustado e Sxy= erro padrão da estimativa. Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

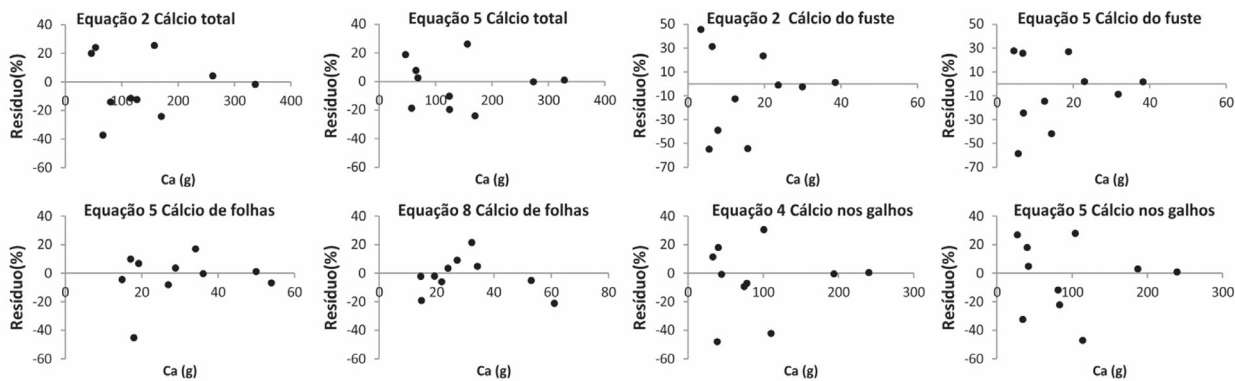


Figura 5. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para cálcio total, fuste, folhas e nos galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Figure 5. Graphic Distributions of waste from equations selected for total calcium, stem, leaves and branches to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

No ajuste para o magnésio, a exemplo do fósforo e do potássio não se obtiveram equações com bons ajustes para todas as partes áreas, apenas para magnésio total e magnésio no fuste (Tabela 7).

Tabela 7. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas para o magnésio total e no fuste para *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 7. Estimates of parameters and selected equations accurately measures adjusted for total and Stem magnesium to *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Magnésio total						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	1,0648	2,92366	-1,00977		81,28	23,70
5	4,17309	0,2684	-0,01046		81,21	23,74
Magnésio do fuste						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
1	1,48706	0,13984	-0,04762	-0,00581	88,34	24,01
5	1,01831	0,1486	-0,00861		89,32	22,98

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj= índice de ajuste ajustado e Sxy= erro padrão da estimativa. Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

Pelas estimativas de precisão e confirmando pela distribuição dos resíduos e equação dois foi a melhor para magnésio total, a equação selecionada para magnésio no fuste foi a cinco, pois apresentou estatísticas um pouco mais precisas que a equação um, sendo que apresentaram distribuições residuais semelhantes diminuindo os desvios a medida que se aumenta o teor de magnésio (Figura 6).

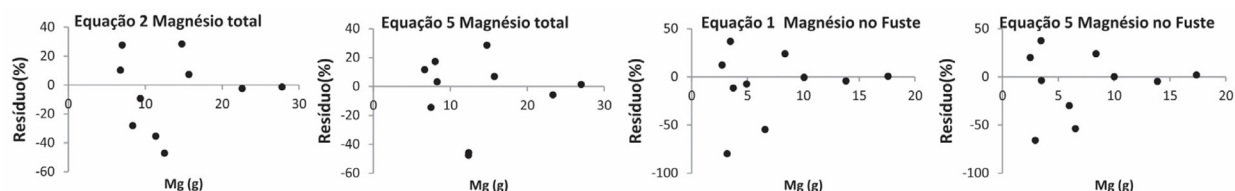


Figura 6. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para magnésio total e no fuste de *Anadenanthera colubrina*, em Floresta-PE.

Figure 6. Graphic Distributions of waste from the equations selected for total magnesium and stem *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

A equação ajustada por Santana et al. (2008), para se estimar magnésio total em eucaliptos obteve R^2 de 92%, Ribeiro et al. (2012), encontraram para sua melhor equação R^2_{aj} de 99,4% e S_{xy} de 3,4%, demonstrando que na maioria dos trabalhos o magnésio total é de fácil ajuste, gerando boas equações nas mais distintas formações.

Phillips et al. (1989) ajustando modelos para estimar magnésio no fuste para as principais espécies do litoral Sul dos Estados Unidos, encontraram para as equações selecionadas R^2 variando de 93% a 98, já Téo (2009), encontrou R^2_{aj} de 65% e S_{xy} de 60%.

Para o enxofre só não foi possível gerar boas equações para enxofre das folhas, mas para as demais áreas foi possível criar boas equações (Tabela 8).

Tabela 8. Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações selecionadas ajustadas para o enxofre total, fuste e galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE.

Table 8. Estimates of parameters and selected equations accurately measures adjusted for total sulfur, stem and branches of *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Enxofre total						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
7	0,03482	0,41317			85,57	29,67
8	0,1653	1,66576	-0,46078		85,53	31,76
Enxofre do Fuste						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
2	-0,08939	0,16176	-0,06399		84,97	22,79
5	0,23414	0,014	-0,00083583		86,20	21,84
Enxofre nos galhos						
Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	IAaj (%)	Sxy(%)
5	-0,51005	0,25269	-0,0107		79,96	36,08
7	-1,43733	0,5687			86,41	41,88

Em que: b_0, b_1, \dots, b_n = coeficientes da equação, IAaj = índice de ajuste ajustado e Sxy = erro padrão da estimativa. Where: b_0, b_1, \dots, b_n = coefficients of the equation, IAaj = adjusted rate adjustment and Sxy = standard error of the estimate.

Comparando as duas melhores equações para enxofre total a equação selecionada foi a sete, pois apresentou estatísticas um pouco melhores que a equação oito e apresentam distribuições residuais semelhantes diminuindo os desvios a medida que se aumenta o teor de enxofre. A equação selecionada para o fuste foi a cinco, pois apresentou estatísticas melhores que a equação um mesmo apresentando distribuições residuais semelhantes. Para os galhos foi a equação sete, pois apresentou IAaj mais elevado que a equação cinco, mesmo apresentando distribuições residuais parecidas, diminuindo os desvios a média que se aumenta o teor de enxofre. (Figura 7).

Ratuchne (2010), ajustando equações para enxofre total de floresta ombrófila densa, obteve para sua melhor equação um R^2_{aj} de 95,5%, porém o S_{xy} foi bastante elevado de 79,9%. Rubilar et al. (2005), obteve uma equação para estimar enxofre no fuste de *Pinus taeda*, com um R^2 de apenas 64%. Comparando as equações obtidas neste estudo, com dos referidos autores infere-se que foram geradas boas equações para se estimar o teor de enxofre para *Anadenanthera colubrina*.

Por fim, estão listadas as equações selecionadas de biomassa e nutrientes que foram criadas para *Anadenanthera colubrina*. Estas equações serviram de subsídio e embasamento para futuros trabalhos científicos e planos de manejo florestal, para se estimar o quanto de biomassa e nutrientes será retirado do ambiente em um futuro processo de colheita, e posteriormente se fazer o processo de recomposição (Tabela 9).

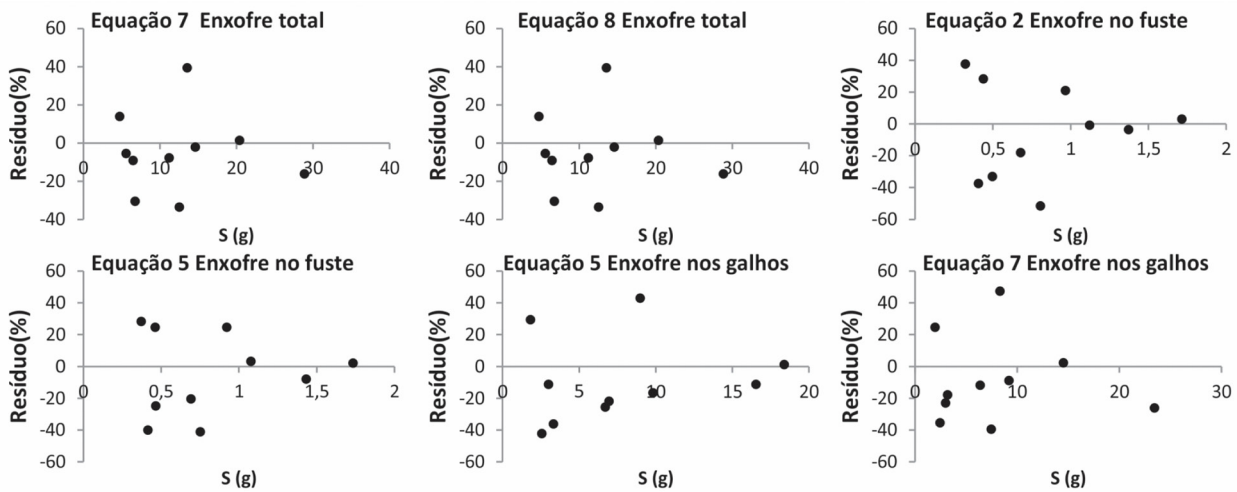


Figura 7. Distribuições gráficas dos resíduos das equações selecionadas para enxofre, total, no fuste e nos galhos de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE

Figure 7. Graphic Distributions of waste from the equations selected for sulfur, total, in the stem and the branches of *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE.

Tabela 9. Equações Criadas para estimar biomassa e nutrientes de *Anadenanthera colubrina* em Floresta-PE, em que IAaj: índice de ajuste ajustado, Sxy: erro padrão da estimativa, DAP: diâmetro a altura do peito, HT: altura total, Hc: altura comercial, B=biomassa verde, N=nitrogênio, P=fosforo, K=potássio, Ca=cálcio, Mg=magnésio, S=enxofre.

Table 9. Created equations to estimate biomass and nutrient *Anadenanthera colubrina* in Floresta-PE, where IAaj: adjusted adjustment index, Sxy: standard error of the estimate, DBH: diameter at breast height, HT: height total, HC: height commercial, B = green biomass, N = nitrogen, P = phosphorus, K = potassium, Ca = calcium, Mg = magnesium, S = sulfur.

Equações para <i>Anadenanthera colubrina</i>		IAaj(%)	Sxy(%)
B.total	$\hat{B}_i = \frac{51,63157}{[1 + 16,05867e^{-0,362138 \cdot DAP_i}]}$	93,45	15,08
B.fuste	$\hat{B}_i = \frac{24,9822}{[1 + 18,05488e^{-0,369833 \cdot DAP_i}]}$	89,43	20,35
B.folha	$\hat{B}_i = 3,99122 - 2,497061e^{-0,000204 \cdot DAP_i + 2,99654}$	83,13	14,99
B.galho	$\hat{B}_i = \frac{22,74502}{[1 + 18,10931e^{-0,353235 \cdot DAP_i}]}$	91,62	18,76
N.total	$\hat{N}_i = 35,81478 + 3,44182DAP_i^2 - 0,16838(DAP_i^2HT)_i$	88,04	16,62
N.fuste	$\hat{N}_i = 99,72195 - 72,72517e^{-(7,15E-13)DAP_i^{13,24435}}$	95,44	12,82
N.folha	$\hat{N}_i = 15,08706 + 1,4889DAP_i^2 - 0,08839(DAP_i^2HT)_i$	78,76	18,68
N.galho	$\ln \hat{N}_i = 1,55972 + 0,50989 \ln(DAP_i^2)_i$	78,54	25,11
P.total	$\hat{P}_i = 3,216711e^{[(\ln DAP_i - 0,01)/1,140942]}$	77,39	22,39
P.galho	$\hat{P}_i = 2,57122 + 0,21101DAP_i^2 - 0,0074(DAP_i^2HT)_i$	80,56	27,71
K.total	$\hat{K}_i = 6,57629 + 2,84903DAP_i - 0,8983HT_i$	91,59	10,73
K.galho	$\hat{K}_i = 18,62887 - 13,84023e^{-(1,78E-09)DAP_i^{8,556776}}$	91,28	19,98
Ca.total	$\hat{Ca}_i = 12,86932 + 3,60801DAP_i^2 - 0,13802(DAP_i^2HT)_i$	92,63	18,72
Ca.fuste	$\hat{Ca}_i = 0,90864 + 0,36848DAP_i^2 - 0,0233(DAP_i^2HC)_i$	91,13	22,09
Ca.folha	$\hat{Ca}_i = 7,9698 + 0,76773DAP_i^2 - 0,03754(DAP_i^2HT)_i$	92,56	12,88
Ca.galho	$\hat{Ca}_i = 4,29589 + 2,3988DAP_i^2 - 0,08343(DAP_i^2HT)_i$	90,39	23,65
Mg.total	$\hat{Mg}_i = 1,0648 + 2,92366DAP_i - 1,00977HT_i$	81,28	23,70
Mg.fuste	$\hat{Mg}_i = 1,01831 + 0,1486DAP_i^2 - 0,00861(DAP_i^2HC)_i$	89,32	22,98
S.total	$\ln \hat{S}_i = 0,03482 + 0,41317 \ln(DAP_i^3)_i$	85,57	29,67
S.fuste	$\hat{S}_i = 0,23414 + 0,014DAP_i^2 - 0,00083583(DAP_i^2HC)_i$	86,20	21,84
S.galho	$\ln \hat{S}_i = -1,43733 + 0,5687 \ln(DAP_i^3)_i$	86,41	41,88

CONCLUSÕES

Para biomassa, nitrogênio e cálcio as equações apresentaram estatísticas significativas, tanto no total como por compartimento, já para fósforo e potássio só foi possível obter boas equações para concentração total e nos galhos, para o magnésio além do total se teve uma boa equação para o fuste. Já para enxofre só não foi possível ajustar uma equação para folhas.

Entre os modelos testados o que mais se destacou foi $Y_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i^2 + \beta_2 (DAP^2 HC)_i + \varepsilon_i$, sendo dele derivadas nove equações.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES JR., F. T.; FERREIRA, R. L. C.; MARANGON, L. C.; SILVA, J. A. A.; GUTTIEREZ-CESPEDES, G. H. Structure evaluation of the Catinga vegetatiton for sustainable forest management in the municipality of Floresta, Pernambuco, Brazil. In: GUKEL, G.; SILVA, J. A. A.; SOBRAL, M. C. (Org.). **Sustainable management of water and land in semiarid areas**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2013, p. 186-202.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus* sp no estado de São Paulo. IPEF, Piracicaba, n. 32, p. 33-42, 1986.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: Embrapa, 1994. 640 p.

FERRAZ, J. S. F.; ALBUQUERQUE, U. P.; MEUNIER, I. M. J. Valor de uso e estrutura da vegetação lenhosa às margens do riacho do Navio, Floresta, PE, Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 125-134, 2006.

GOMES, A. G.; VARRIALE, M. C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**. 2.ed. Santa Maria, Editora UFSM, 2004. 503 p.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 153-166, 1998.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2.ed. Fortaleza: Printicolor Gráfica e Editores, 2012. 413 p.

MEYER, H. A. The standard error of estimate of tree volume from the logarithmic volume equation. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 36, p. 340-342, 1943.

MORALES, F. E. R. **Estimação dos parâmetros de um círculo para modelos Heteroscedásticos de regressão**. 2006. 102 p. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

PHILLIPS, D. R.; MESSINA, M. G.; CLARK III, A.; FREDERICK, D. J. Nutrient Content Prediction Equations for Wetland Trees in the US Southern Coastal Plain. **Biomass**, v. 19, p. 169-187, 1989.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para a estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta ombrófila mista**. 2010. 111 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

RESENDE, A. V.; VALE, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILL, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 65-76, 2006.

RIBEIRO, A.; MACHADO, S. A.; PELLICO NETO, S.; FIGUEREDO FILHO, A. Quantificação e modelagem de macronutrientes em povoamentos de bracatinga. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 29-43, 2012.

RUBILAR, R. A.; ALLEN, H. L.; KELTING, D. L. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on Upper Coastal Plain Site. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 6, p. 548-564, 2005.

SAMPAIO, E.; GASSON, P.; BARACAT, A.; CUTLER, D.; PAREYN, F.; LIMA, K. C. Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 259, n. 6, p. 1135-1140, 2010.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; CÔRTE, A. P. D.; FERNANDES, L. A. V.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 2.ed. Curitiba: Multh-graphic Gráfica Editora, 2009. 270 p.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucaliptos no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. Especial, p. 2723-2733, 2008.

SCHACHT, W. H.; MESQUITA, R. C. M.; MALECHEK, J. C.; KIRMSE, R. D. Response of caatinga vegetation to decreasing levels of canopy cover. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 11, p. 1421-1426, 1989.

SCHALAEGL, B. E. Testing, reporting, and using biomass estimation models. In: SOUTHERN FOREST BIOMASS WORKSHOP. 1981, Georgetown, **Proceedings...** Georgetown: Clemson University, 1981. p. 95-112.

SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI JR., F. W. (Org.). **Inventário Floresta de Minas Gerais**. Belo Horizonte: UFLA, 2008. p. 117-148.

SCOLFORO, J. R. S.; RUFINI, A. L.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D.; SILVA, C. P. C.; TRUGILHO, P. F. Equações de volume, peso de matéria seca e produção de tanino do Angico-vermelho (*Anadenanthera colubrina* (Benth.) Brenan). em Minas Gerais. In:

SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; CÔRREA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação da biomassa e ajuste de equações para a estimativa da biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de pesquisas florestais**, Colombo, n. 49, p. 83-95, 2004.

TÉO, S. J. **Quantificação e modelagem do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea de bracatinga (*Mimosa scabrella* bentham)**. 2009. 157 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

VISMARA, E. S. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa**. 2009. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* l. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

Recebido em 05/11/2015

Aceito para publicação em 23/02/2016