

Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus

Ana Beatriz Schikowski¹, Ana Paula Dalla Corte¹, Carlos Roberto Sanquetta¹

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais, Av. Prof. Lothário Meissner, 900, CEP 80210-170, Curitiba, PR, Brasil

*Autor correspondente:
anapaulacorte@gmail.com

Termos para indexação:

Peso seco
Estimativa
Compartimentos

Index terms:

Dry weight
Estimative
Compartments

Histórico do artigo:

Recebido em 20/03/2013
Aprovado em 09/08/2013
Publicado em 30/09/2013

doi: 10.4336/2013.pfb.33.75.503

Resumo - Este estudo tem como objetivo testar modelos matemáticos para estimativas de biomassa de diferentes compartimentos de *Pinus* spp., a partir de variáveis de fácil mensuração. Os dados utilizados são provenientes de plantios localizados no centro sul do estado do Paraná. Foram utilizados dados de peso seco total e parcial de 35 árvores de *Pinus* spp., obtidos por meio do método destrutivo direto. De cada árvore amostrada foram medidos também o CAP (circunferência à altura do peito) e a altura total. Os modelos para estimativa de biomassa de folhagem não apresentaram bom desempenho, verificado pelos indicadores de ajuste. Entretanto, para os compartimentos: galhos, raízes, casca, fuste e para biomassa total, os ajustes apresentaram elevados valores de R^2 e baixos valores de $Syx\%$. O modelo de crescimento de Richards obteve melhor desempenho que os demais testados para a estimativa da biomassa total.

Modelling Pinus biomass growth and yield

Abstract - This study aimed to test mathematical models for estimating of *Pinus* spp. biomass of different compartments, using easily measuring variables. The data were collected from plantations located in central Paraná state, Brazil. The data were obtained from total and partial dry weights of 35 trees of *Pinus* spp., obtained using direct destructive methods. CBH (circumference at breast height) and total height were measured for each tree sampled. The models for estimating leaves dry weight were not satisfactory, verified by adjusted indicators. However, for branches, roots, bark, stem and total biomass the resulted equations provided reliable estimative for all models tested, with high R^2 values and low $Syx\%$. Richards growth model presented the best adjustment among the other models tested to estimate total biomass.

Introdução

Para gerar estimativas precisas do papel das florestas nas mudanças climáticas, torna-se necessário a adoção de métodos de quantificação de biomassa vegetal acima e abaixo do solo (Ravindranath & Ostwald, 2008), para assim compreender o processo de crescimento e alocação de carbono e de nutrientes nos diferentes compartimentos das árvores (Mello & Gonçalves, 2008). A biomassa vegetal é a quantidade em massa de material vegetal estocada em uma floresta. Segundo Rezende (2000), a quantificação da biomassa vegetal pode ser determinada basicamente por dois métodos, o destrutivo e o não-destrutivo. Pelo método destrutivo as determinações são feitas pela medição real diretamente na floresta. Este método implica em corte e medição da massa dos componentes na floresta. O método não destrutivo utiliza-se das relações entre a variável biomassa e outras variáveis oriundas do inventário florestal, como dap (diâmetro a 1,30 m do solo), altura e volume. Através destas relações são construídos modelos que expressam a variável biomassa através de variáveis de fácil mensuração (Salati, 1994).

Silveira et al. (2008) comentam que o método destrutivo implica em alto custo, além de estar sujeito a escolha tendenciosa de local de estudo, enquanto que no método por estimativas as incertezas aumentam com a extrapolação de uma equação alométrica, pois diferentes ambientes são dominados por diferentes espécies, conseqüentemente, as relações alométricas também são diferentes.

Segundo Salati (1994), os métodos indiretos são utilizados para estimar a biomassa de áreas florestais de grande extensão e, dependendo das informações disponíveis, são usadas relações empíricas entre a biomassa e outras variáveis, determinando-se assim o valor da biomassa seca por hectare, para então ser feita uma extrapolação para a área total considerada.

Porém, para que os métodos indiretos sejam utilizados, precisam ser gerados modelos alométricos, que relacionem a variável biomassa ou carbono, variáveis de difícil medição, com variáveis comumente medidas em campo nos trabalhos de inventário florestal, como diâmetro, altura e área transversal.

Martinelli et al. (1994) justificam que no método direto, a pesagem de todo material é o mais confiável, porém, o maior problema é a demanda de tempo e mão-de-obra, tornando os custos muito elevados. Portanto,

para a aplicação da técnica de regressão, o procedimento adotado consiste em cortar algumas árvores da área de estudo e medir a massa, diâmetros à altura do peito, altura e densidade, e, posteriormente, relacionar estes parâmetros com a massa da árvore, utilizando-se de um modelo matemático, que reflita o melhor ajuste.

Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver equações alométricas para estimar a biomassa total (peso seco) e a biomassa de cinco compartimentos da árvore (folhagem, raízes, fuste, galhos, casca) para o gênero *Pinus* spp. Também fez parte do objetivo deste trabalho o desenvolvimento de equações para estimativa da produção de biomassa com a finalidade de comparar possíveis cenários de estoque de biomassa com plantios de *Pinus* spp.

Material e métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados 35 indivíduos das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, plantados em povoamentos localizados no centro sul do Estado do Paraná. A seleção dos indivíduos representativos ocorreu dentro da amplitude diamétrica 3,6 cm a 35,9 cm, em idades variando entre 2 anos e 22 anos. Com os indivíduos selecionados, realizou-se o método destrutivo de quantificação de biomassa.

Após a escolha dos indivíduos, procedeu-se à mensuração do dap. Em seguida, os indivíduos foram derrubados e a altura total da árvore (ht) foi medida utilizando uma fita métrica. A variável idade foi determinada em função da contagem dos anéis de crescimento das árvores e dos registros históricos.

Para a pesagem da biomassa em campo, cada árvore foi separada em 5 compartimentos, sendo eles: fuste, casca, galhos, folhagem e raízes. Cada compartimento foi pesado individualmente com sua umidade natural, empregando-se uma balança mecânica com capacidade para 100 kg e precisão de 100 g. Para a determinação da biomassa abaixo do solo, abriu-se uma trincheira até o limite da abrangência da copa das árvores projetadas para o solo, para o recolhimento de toda a massa de raízes, considerando um limite de 2 mm de espessura e 50 cm de profundidade. Uma amostra de 500 g foi tomada de cada compartimento para determinar o peso da biomassa seca, que foi determinado após as amostras terem sido secas em estufa com renovação de ar numa temperatura de 80 °C, por aproximadamente

15 dias, até atingirem peso constante. Assim, a partir da determinação dos teores de umidade das amostras, foi possível relacionar com a biomassa verde em campo, para a obtenção da biomassa seca estimada para cada compartimento de cada árvore.

Teste de modelos alométricos para estimativa de biomassa total e por compartimento

Após a tabulação dos dados referentes à biomassa seca, foram testados 5 modelos tanto para a biomassa total como para cada um dos 5 compartimentos da árvore, totalizando assim, 30 modelos ajustados. Os modelos ajustados têm por objetivo estimar a biomassa seca de cada compartimento (variável dependente) em função de variáveis independentes de fácil obtenção (dap e ht). A seguir são apresentados os modelos testados para a estimativa da biomassa seca total de *Pinus* spp.

$$bs = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 + dap^2 \quad (1)$$

$$bs = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2 ht \quad (2)$$

$$bs = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2 + \beta_3 dap^2 ht \quad (3)$$

$$bs = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 + \beta_2 dap^2 ht \quad (4)$$

$$bs = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 ht \quad (5)$$

Onde: bs = biomassa seca de cada compartimento (kg); DAP = diâmetro a 1,30 do peito (cm); ht = altura total (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, e β_3 = coeficientes de regressão.

A seleção dos melhores modelos foi baseada nos indicadores de qualidade de ajuste, sendo: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S_{yx} %) e análise gráfica dos resíduos, sendo que a precisão foi obtida através da média dos resíduos, e ANOVA de regressão.

Teste de modelos biológicos de crescimento para estimativa de biomassa total

Com base nos dados de dap coletados em campo e suas respectivas idades, é possível testar modelos de crescimento com base na área basal e idade. Os modelos testados foram os de Weibull (Weibull, 1951), Logística (Nelder, 1961), Richards (Richards, 1959), Korf (Korf, 1939) e Schumacher (Schumacher, 1939).

$$f(x) = \beta_0 * (1 - e^{-\beta_1 * x^{\beta_2}}) \quad \text{Weibull} \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_2 * e^{-\beta_1 * x})} \quad \text{Logística} \quad (7)$$

$$f(x) = \beta_0 * (1 - e^{-\beta_1 * x})^{\beta_2} \quad \text{Richards} \quad (8)$$

$$f(x) = \beta_0 * e^{-\beta_1 * x - \beta_2} \quad \text{Korf} \quad (9)$$

$$f(x) = \beta_0 * e^{-\beta_1 * \left(\frac{1}{x}\right)} \quad \text{Schumacher} \quad (10)$$

Onde: $f(x)$ = biomassa seca total (kg); e = exponencial; x = idade (anos); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$ = coeficientes ajustados.

Resultados e discussão

Distribuição da biomassa em compartimentos

Foi avaliada a evolução da participação dos distintos compartimentos da biomassa em relação à idade, conforme pode ser observado na Figura 1. O fuste sempre foi o compartimento que apresentou a maior participação na biomassa total individual. Evidencia-se a crescente proporção percentual do fuste ao longo das classes etárias, que para as faixas iniciais (de zero a cinco anos) foi de 37,85%, chegando a mais de 70% para as árvores mais velhas. O contrário ocorre com as acículas, que na classe de idade inicial representa 16,02% da biomassa, caindo para 7,70% nas idades intermediárias (classe de 5 a 10 anos), chegando a 1,39% nas idades superiores a 20 anos. Já em relação às raízes, à casca e aos galhos ocorrem oscilações da participação desses compartimentos da biomassa ao longo das idades, não se evidenciando uniformidade, embora seja percebida a tendência de diminuição de suas participações com o crescimento do fuste. Valores semelhantes para os diferentes compartimentos foram observados por Sanquetta et al. (2003), Watzlawick & Caldeira (2004), Vieira et al. (2011) e Witschoreck (2008), quando feita a comparação com idades semelhantes a esse trabalho.

Rondon (2002) observou que a biomassa aérea das árvores se concentra principalmente na porção tronco.

Ainda, segundo Sanquetta et al. (2003) e Balbinot et al. (2008), o fuste representa mais de 50% da biomassa para *Pinus taeda*, sendo também observado no presente

estudo a partir dos 5 anos de idade. Anteriormente a essa idade, há uma maior distribuição na biomassa, porém o fuste ainda apresenta a maior porcentagem.

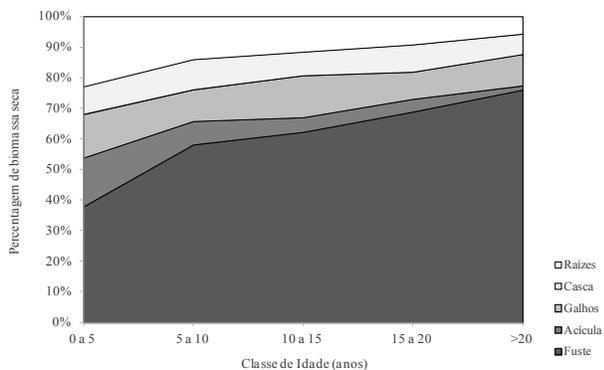


Figura 1. Percentagem da biomassa ao longo de diferentes idades de *Pinus* spp.

Segundo Valério (2009), os estudos de determinação de biomassa não devem desprezar as raízes tendo em vista que elas têm uma boa representatividade nos dados. Sette Junior et al. (2004) encontraram em seu trabalho para plantios de *Pinus taeda* em Santa Catarina, nas idades de 5, 12, 18 e 26 anos, biomassa média do fuste de 10,76 kg, 101,95 kg, 262,74 kg e 393,54 kg. Os valores apresentados por esses autores assemelham-se aos encontrados neste trabalho para a biomassa do fuste. Entretanto, quando se analisa a variável biomassa total da árvore, fica explícita a importância e a representatividade dos outros compartimentos, além do fuste, na estimativa da biomassa total e consequente influência desses na estimativa para o povoamento florestal.

Análise de correlação entre variáveis

Conforme observado na Tabela 1, as variáveis ht e dap possuem correlações muito aproximadas, indicando assim a similaridade dessas duas variáveis na explicação da biomassa, bem como o alto grau de correspondência entre elas. A variável idade também apresenta alta correlação com as variáveis de biomassa, porém baixa correlação com a biomassa das acículas, assim como as variáveis dap e ht.

A alta correspondência da biomassa total com a biomassa dos compartimentos se deve ao caráter acumulativo dos mesmos, que no decorrer do crescimento da árvore são incorporados ao indivíduo ao invés de deposição no solo, como ocorre com parte das acículas. As acículas são depositadas ao longo da idade do povoamento, enquanto cascas, galhos e serragem do tronco retornam apenas após a exploração (Auer et al., 2007), bem como as raízes e tocos que lá apodrecem. Essa variação da taxa de deposição pode variar com a idade dentre outros fatores (Schumacher & Pogiani, 2000; Figueiredo Filho et al., 2003; Moreira & Silva, 2004; Fernandes et al., 2007), assim como o padrão de produção da folhagem é influenciado, por exemplo, por estresse hídrico (Delitti, 1989). Assim, pode se considerar a taxa de rotatividade das acículas uma das responsáveis pela baixa correlação com as variáveis independentes, dap, ht e idade, pois fatores inerentes ao meio em que se encontra a árvore são determinantes na quantidade de biomassa na parte aérea e na sua deposição no solo.

Ajuste de equações alométricas de biomassa

Os modelos para biomassa seca total em função de dap e altura tiveram ajustes mais precisos, com o coeficiente de determinação oscilando entre 0,84 e 0,97 e o erro

Tabela 1. Correlação entre variáveis.

	Dap	ht	Idade	bs _{total}	bs _{fuste}	bs _{raízes}	bs _{galhos}	bs _{casca}
ht	0,973	-	-	-	-	-	-	-
Idade	0,953	0,967	-	-	-	-	-	-
bs _{total}	0,916	0,910	0,931	-	-	-	-	-
bs _{fuste}	0,884	0,889	0,909	0,992	-	-	-	-
bs _{raízes}	0,899	0,899	0,890	0,864	0,807	-	-	-
bs _{galhos}	0,872	0,809	0,816	0,923	0,884	0,832	-	-
bs _{casca}	0,876	0,877	0,940	0,919	0,881	0,900	0,841	-
bs _{acícula}	0,690	0,617	0,641	0,587	0,498	0,712	0,674	0,690

bs = biomassa (kg); dap = diâmetro à altura do peito (cm); ht = altura total (m).

padrão da estimativa entre 15,30% e 37,20%. O modelo 5 apresentou coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa em porcentagem com menor qualidade de ajuste, ou seja, coeficiente de determinação menor e erro padrão da estimativa maior (Tabela 2). Comparando-se os modelos 1 a 4, o que se mostrou mais adequado foi o 4, devido aos indicadores de ajuste e à distribuição balanceada dos resíduos (Figura 2), com 94% de precisão.

Os modelos testados para biomassa seca individual do fuste apresentaram coeficientes de determinação elevados, que variaram de 0,78 a 0,98, e erros padrão da estimativa oscilando entre 14,20% a 50,62%. O modelo com melhor desempenho para a estimativa de biomassa do fuste foi o 3, que teve indicadores de ajuste melhores e distribuição gráfica dos resíduos balanceada (Figura 2) e chegou a precisão de 97%. Os modelos 2 e 4 também mostraram bons resultados, próximos daqueles obtidos com o ajuste do modelo 3.

Tabela 2 - Equações ajustadas para estimativa da biomassa seca de *Pinus* spp.

Compartmento	Equação	R ²	Syx %
Total	(1) $bs_{total} = 109,4775 - 20,1123 * dap + 1,0041 * dap^2$	0,96	17,68%
	(2) $bs_{total} = -12,9265 + 1,4294 * dap + 0,0185 * dap^2 * ht$	0,97	15,36%
	(3) $bs_{total} = 12,1156 - 2,5386 * dap + 0,1702 * dap^2 + 0,0156 * dap^2 * ht$	0,97	15,51%
	(4) $bs_{total} = -6,0656 + 0,0719 * dap^2 - 0,0171 * dap^2 * ht$	0,97	15,30%
	(5) $bs_{total} = -297,2604 + 15,5684 * dap + 11,5991 * ht$	0,84	37,20%
Fuste	(1) $bs_{fuste} = 95,0601 - 18,4670 * dap + 0,8173 * dap^2$	0,95	23,72%
	(2) $bs_{fuste} = 25,4598 - 2,9716 * dap + 0,0165 * dap^2 * ht$	0,98	14,77%
	(3) $bs_{fuste} = -5,6500 + 2,8385 * dap - 0,2716 * dap^2 + 0,0214 * dap^2 * ht$	0,98	14,23%
	(4) $bs_{fuste} = 11,8180 - 0,1513 * dap^2 + 0,0194 * dap^2 * ht$	0,98	14,20%
	(5) $bs_{fuste} = -158,1970 + 1,4842 * dap + 17,9364 * ht$	0,78	50,62%
Raízes	(1) $bs_{raízes} = -9,3709 + 1,2439 * dap + 0,0122 * dap^2$	0,82	29,28%
	(2) $bs_{raízes} = -11,8026 + 1,5909 * dap + 0,0001 * dap^2 * ht$	0,82	29,48%
	(3) $bs_{raízes} = -5,0506 - 0,3299 * dap + 0,0589 * dap^2 - 0,0009 * dap^2 * ht$	0,82	29,23%
	(4) $bs_{raízes} = -3,0203 + 0,0729 * dap^2 - 0,0011 * dap^2 * ht$	0,82	28,87%
	(5) $bs_{raízes} = -10,2883 + 0,6824 * dap + 1,3065 * ht$	0,83	28,25%
Galhos	(1) $bs_{galhos} = 5,2621 - 1,4193 * dap + 0,0918 * dap^2$	0,85	37,29%
	(2) $bs_{galhos} = -9,2017 + 0,8716 * dap + 0,0014 * dap^2 * ht$	0,81	42,02%
	(3) $bs_{galhos} = 21,8125 - 4,9206 * dap + 0,2708 * dap^2 - 0,0035 * dap^2 * ht$	0,88	32,86%
	(4) $bs_{galhos} = -8,4690 + 0,0622 * dap^2 - 0,0001 * dap^2 * ht$	0,83	38,97%
	(5) $bs_{galhos} = -32,7857 + 3,6941 * dap - 1,4510 * ht$	0,75	48,37%
Casca	(1) $bs_{casca} = -2,0234 + 0,0686 * dap + 0,0375 * dap^2$	0,80	38,74%
	(2) $bs_{casca} = -6,7221 + 0,0686 * dap + 0,0375 * dap^2 * ht$	0,80	39,09%
	(3) $bs_{casca} = -2,1448 - 0,0652 * dap + 0,0400 * dap^2 + 0,0000 * dap^2 * ht$	0,79	39,27%
	(4) $bs_{casca} = -2,5458 - 0,0372 * dap^2 + 0,0001 * dap^2 * ht$	0,80	38,74%
	(5) $bs_{casca} = -13,8224 + 0,5669 * dap + 1,3525 * ht$	0,76	41,90%
Folhagem	(1) $bs_{folhagem} = -4,0079 + 0,8012 * dap - 0,0043 * dap^2$	0,52	46,45%
	(2) $bs_{folhagem} = -5,8779 + 0,9052 * dap - 0,0002 * dap^2 * ht$	0,54	45,32%
	(3) $bs_{folhagem} = 5,8840 - 1,2914 * dap + 0,1027 * dap^2 - 0,0021 * dap^2 * ht$	0,66	38,92%
	(4) $bs_{folhagem} = -2,0634 + 0,0479 * dap^2 - 0,0012 * dap^2 * ht$	0,63	40,69%
	(5) $bs_{folhagem} = -4,9908 + 1,3871 * dap - 0,9264 * ht$	0,56	44,37%

Onde: bs = biomassa (kg); dap = diâmetro à altura do peito (cm); ht = altura total (m).

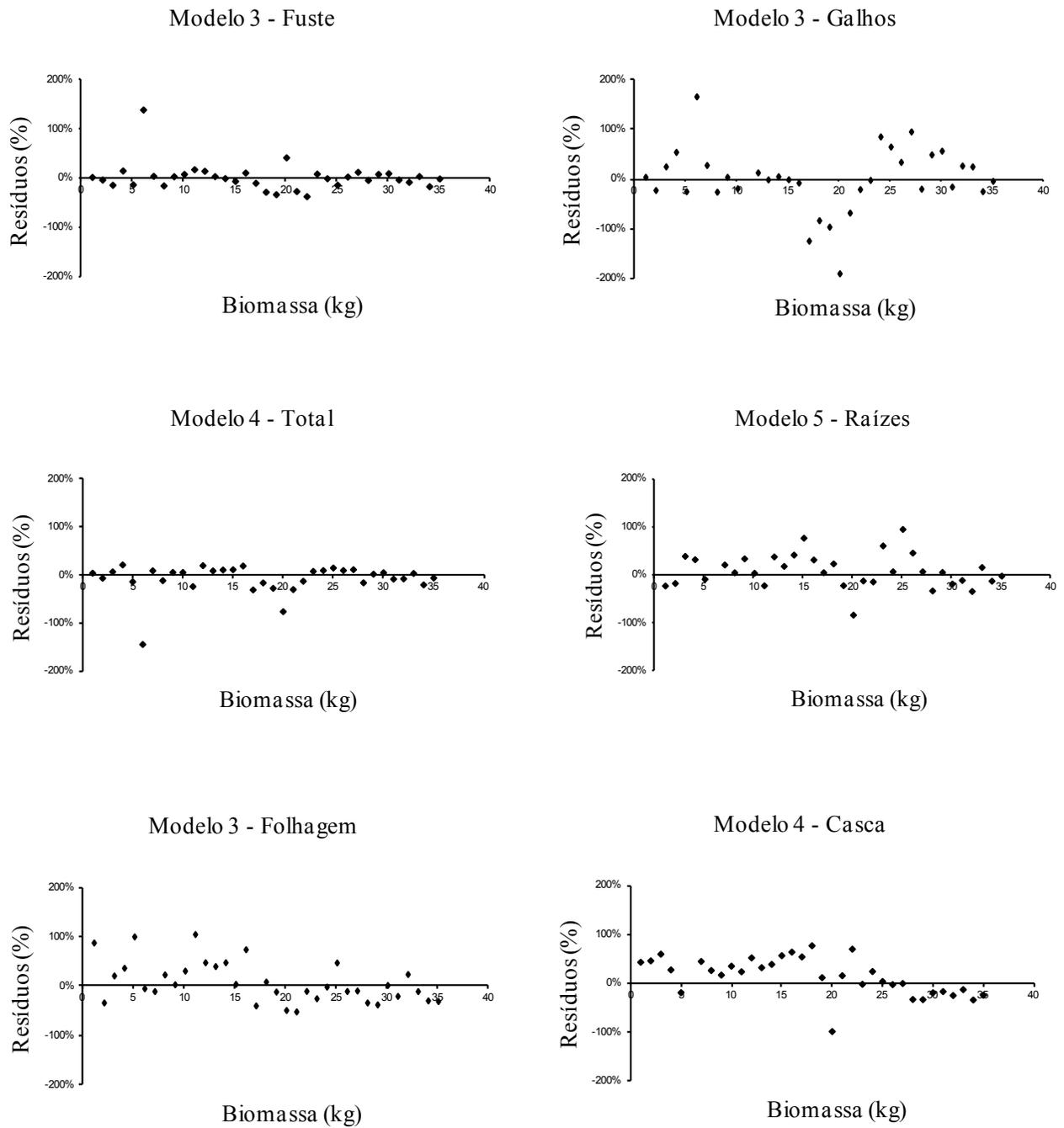


Figura 2. Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações para as estimativas em *Pinus* spp.

As equações ajustadas para estimativa de biomassa seca das raízes apresentaram comportamentos semelhantes, com pouca variação nos parâmetros comparativos, como observado na tabela 2. O coeficiente de determinação variou entre 0,82 e 0,83, valores considerados razoáveis, enquanto o erro padrão da estimativa variou de 28,25% a 29,48%, indicando menor precisão comparativa aos ajustes para biomassa total e para o fuste. Com base nos indicadores de ajustes e na análise de resíduos (Figura 2), o modelo 5 foi o que mais se destacou, com 96% de precisão.

O desempenho das equações para biomassa seca dos galhos foi menos satisfatório em comparação aos ajustes para a biomassa total, para o fuste e raízes, com erro padrão da estimativa oscilando entre 32,86% e 48,37%, apesar de os valores do coeficiente de determinação ficarem em patamar de 0,75 a 0,88. Com relação à distribuição gráfica dos resíduos, todos os modelos apresentaram expressiva dispersão dos valores, indicando imprecisão. Dentre os modelos testados, o 3 foi o que apresentou melhor desempenho para a estimativa de biomassa seca de galhos, com precisão de 92%.

Os ajustes para biomassa seca da casca tiveram comportamentos semelhantes aos ajustes para galhos. O coeficiente de determinação ficou entre 0,76 e 0,80, enquanto o erro padrão da estimativa variou entre 38,74% e 41,90%. A dispersão dos resíduos detectada na análise gráfica indicou imprecisão. O modelo que apresentou melhor desempenho para estimativa da casca foi o de número 4.

Com relação à folhagem, os ajustes das equações resultaram em coeficientes de determinação oscilando

de 0,52 a 0,66, os mais baixos entre todos os ajustes para os compartimentos da biomassa estudados. Da mesma forma, os erros padrão da estimativa foram altos, oscilando de 38,92% a 46,45%, indicando a baixa precisão das estimativas de biomassa foliar obtidas com todos os modelos. O modelo que apresentou melhor desempenho para estimativa da folhagem foi o de número 3, com 92% de precisão, considerando os indicadores de ajuste e a distribuição gráfica de resíduos, muito embora as estimativas geradas com este sejam insatisfatórias.

Todos os modelos testados obtiveram valor de F significativo, indicando assim que existe relação entre as variáveis. Em estudo com as mesmas equações, só que para biomassa verde, Sanquetta et al. (2003) também apresentaram ajustes muito bons para biomassa do fuste, com R^2 elevado e S_{yx} baixos. Porém os indicadores estatísticos para o ajuste das raízes foram muito distintos dos encontrados no presente trabalho, oscilando R^2 de 33,54 a 49,85, que são extremamente baixos e S_{yx} próximos de 21% a 24%.

Ajuste equações de crescimento em biomassa

Com base na idade e na biomassa seca de cada árvore foram testados cinco modelos para expressar o seu crescimento, cujos resultados de ajuste encontram-se na Tabela 3. Os ajustes demonstraram que o modelo com melhor desempenho foi o de Richards, com o coeficiente de determinação 0,91 e o erro padrão da estimativa 27,67%, chegando a 95% de precisão. Os modelos de Korf e de Schumacher também foram considerados satisfatórios, enquanto os de Weibull e Logística não se mostraram apropriados.

Tabela 3. Equações de crescimento individual em biomassa seca para *Pinus* spp.

	Equação	R ²	S _{xy} %
Weibull	$f(x) = 2498,92467 * (1 - e^{(-0,000176 * x)^{66,40163}})$	0,74	46,72
Logística	$f(x) = \frac{16,74555}{(1 - 0,86841 * e^{0,00561 * x})}$	0,81	39,80
Richards	$f(x) = 69312,66379 \left(1 - e^{-0,00476 * x} \right)^{1,92653}$	0,91	27,67
Korf	$f(x) = 48,14381 * e^{0,17517 * x - 0,76174}$	0,90	29,06
Schumacher	$f(x) = 2401,20989 * e^{-25,68089 * \left(\frac{1}{x} \right)}$	0,89	30,62

A Figura 3 representa graficamente os modelos de crescimento. Pode-se observar a tendência da estimativa de cada modelo. O modelo de Weibull possui tendência linear de crescimento. Possivelmente, esse é o motivo do alto valor do erro padrão da estimativa do modelo, já que a curva de crescimento mais próxima do crescimento real é sigmoidal,

não linear. O modelo logístico tem uma curva muito acentuada, com um alto valor inicial que varia lentamente até aproximadamente 16 anos, e cresce repentinamente após essa idade. O melhor modelo segundo os indicadores de ajuste é o de Richards, modelo que apresenta crescimento mais regular dentre os outros modelos.

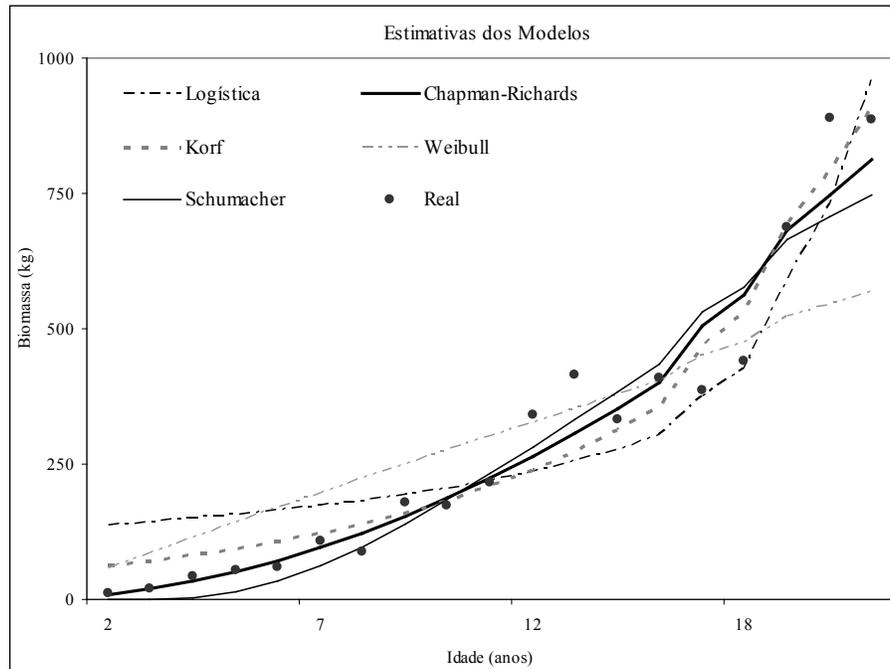


Figura 3. Comportamento dos modelos biológicos testados para as estimativas em *Pinus* spp.

Comparação do desempenho dos modelos alométricos e de crescimento

Foi feita uma comparação entre o desempenho das estimativas obtidas via equações alométricas e de crescimento, com os valores reais de biomassa média seca total para as idades 5, 10, 15 e 20 anos. Foi utilizado o modelo 4 para ajuste da biomassa, modelo este que utiliza como variáveis independentes o dap e

a altura das árvores. Para a estimativa de biomassa a partir de modelo de crescimento foi utilizada a equação de Richards, que usa como variável independente somente a idade. Observou-se que o melhor resultado foi alcançado com emprego da equação de crescimento (Tabela 4), a qual gerou valores estimados mais próximos da biomassa real medida em campo em todas as classes de idade consideradas.

Tabela 4. Comparação entre equação alométrica, de crescimento e valor real da biomassa individual de *Pinus* spp.

Idade (Anos)	Diâmetro médio (cm)	Altura média (m)	Biomassa real obtida em campo (kg)	Biomassa estimada pela equação ajustada (kg)	Biomassa estimada pela equação de crescimento (kg)
5	14,96	8,35	55,373	42,355	50,502
10	23,13	17,85	173,424	196,962	187,653
15	28,97	22,78	408,519	380,691	400,628
20	37,56	27,60	688,205	760,377	681,744

Conclusões

Os ajustes para biomassa seca total e biomassa seca do fuste se mostraram precisos, ao nível de 95% de probabilidade, para a maioria dos modelos alométricos testados, com precisão de 94% e 97%, respectivamente, para as melhores equações. Entretanto, para os demais compartimentos os ajustes de biomassa seca foram piores em decorrência da modesta correlação observada entre esse e as variáveis dendrométricas.

As equações de produção para biomassa seca total apresentaram potencial para aplicação satisfatórios, fato esse explicado pela alta correlação observada entre as variáveis utilizadas nessa modelagem. O modelo com melhor desempenho foi o de Richards com $R^2 = 0,91$ e $S_{yx}\% = 27,67\%$.

Apesar da menor qualidade no ajuste dos modelos de crescimento em relação aos modelos alométricos, no que diz respeito à estimativa da biomassa seca total individual, as estimativas médias com a equação de crescimento de melhor desempenho (Richards) se aproximaram mais dos dados reais medidos em campo, quando observado o cenário comparativo para às estimativas obtidas com a melhor equação alométrica.

Para a geração de estimativa precisa da biomassa de plantios com *Pinus taeda*, é necessário que se considere todos os compartimentos da biomassa da árvore, visando a uma estimativa mais próxima da realidade.

Referências

- ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para Eucalyptus grandis**. 2000. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- AUER, C. G.; GHIZELINI, A. M.; PIMENTEL, I. C. Decomposição fúngica de acículas em plantios de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 54, p.127-138, jan/jun. 2007.
- BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de Carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, abr./jun. 2008.
- DELITTI, W. B. C. Ciclagem de nutrientes minerais em matas ciliares. In: SIMPOSIO SOBRE MATA CILIAR, 1989, São Paulo. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 88-98.
- FERNANDES, M. E. B.; NASCIMENTO, A. A. M.; CARVALHO, M. L. Estimativa da produção anual de serapilheira dos bosques de mangue no Furo Grande, Bragança-Pará. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 949-958, 2007.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MORAES, G. F.; SCHAAF, L. B.; FIGUEIREDO, D. J. de. Avaliação estacional da deposição de serapilheira em uma Floresta Ombrófila Mista localizada no sul do estado do Paraná. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 13, n. 1, p.11-18, 2003.

KORF, V. Příspěvek k matematické definici vzrůstového zákona lesních porostů. **Lesnická práce**, n. 18, p. 339–379, 1939.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p 197-221.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

MOREIRA, P. R.; SILVA, O. A. Produção de serapilheira em área reflorestada. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 49-59, 2004.

NELDER, J. A. The fitting of a generalization of the logistic curve. **Biometrics**, Washington, US, v. 17, n. 1, p. 89-110, 1961.

RAVINDRANATH, N. H.; OSTWALD, M. **Carbon inventory methods: handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects: advances in global change research: volume 29**. Dordrecht: Springer, 2008. p. 107

REZENDE, D. **Seqüestro de carbono: uma experiência concreta**. Goiânia: Terra, 2000. 105 p.

RICHARDS, J. F. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 10, n. 2, p. 290-301, 1959.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* sob diferentes espaçamentos na região da mata. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 573-576, 2002.

SALATI, E. Emissão x Seqüestro de CO₂ - Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p 15-37.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e Conteúdo de Carbono em Plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 33-40, 2003.

SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies. **Journal of Forestry**, Washington, US, v. 37, p. 819-820, 1939.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J. L.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 285-306.

- SCHUMACHER, M. V. Estoque de carbono em florestas de *Pinus taeda* L. e *Acacia mearnsii* De Wild. Plantadas no estado do Rio Grande do Sul – Brasil. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). As florestas e o carbono. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 141-152.
- SETTE JUNIOR, C. R.; GEROMINI, M. P.; NAKAJIMA, N. Y. Quantificação de biomassa do tronco de *Pinus taeda* em plantios com diferentes idades na região de Rio Negrinho - SC. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 4, p. 343-346, 2004.
- SETTE JUNIOR, C. R.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho-SC. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2006.
- SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.
- VALÉRIO, A. F. **Qualificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliottii* Eng. com diferentes idades**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati.
- VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 371-379, 2011.
- WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa de biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v.1, n.4, p. 371-380, 2004.
- WEIBULL, W. A. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v. 18, n. 1, p. 293-297, 1951.
- 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. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.