

Equações para estimativa de volume, biomassa e carbono para três espécies nativas da Amazônia, cupiúba (*Goupia glabra* Aubl), angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e mandioqueira escamosa (*Qualea paraensis* Ducke)

Equations for estimating volume, biomass and carbon for three Amazonian species, cupiúba (Goupia glabra Aubl), red angelim (Dinizia excelsa Ducke) e mandioqueira escamosa (Qualea paraensis Ducke)

Robson Carmo Lima ^{1*}, Eleneide Doff Sotta ², Mikael Bruno Brito Ramos ³, Breno Marques da Silva e Silva ⁴, Perseu da Silva Aparício ⁵, Yan Klaus Santos dos Santos ⁶

¹Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia pela Rede Bionorte pela Universidade Federal do Estado do Amapá. Brasil. E-mail: robsoncl91@hotmail.com * Autor para correspondência

²Engenheira Florestal, Doutorado em Forestry and Forest Ecology pelo Universitat Goettingen, Pesquisadora cedida do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil. E-mail: esotta@gmail.com

³Acadêmico de Engenharia Florestal do Instituto Macapaense de Ensino Superior-IMMES Brasil. E-mail: mkl.brito12@gmail.com

⁴Biólogo, Doutor em Agronomia pela UNESP, Docente da Universidade do Estado do Amapá-UEAP. Brasil. E-mail: silvabms@hotmail.com

⁵Engenheiro Florestal, Doutor em Biodiversidade Tropical pela Universidade Federal do Amapá, Docente da Universidade do Estado do Amapá-UEAP. Brasil. E-mail: perseu_aparicio@yahoo.com.br

⁶Engenheiro Florestal pelo Instituto Macapaense de Ensino Superior-IMMES. Brasil. E-mail: yanklaus.ss@gmail.com

Palavras-chave

Volume
Biomassa
Carbono
Alometria

Algumas equações, para povoamento total, para estimar volume, biomassa e estoque de carbono em florestas da Amazônia podem apresentar estimativas subestimadas ou superestimadas, quando essas equações são utilizadas por espécies. Logo, este estudo teve como objetivo ajustar equações para estimar o volume comercial, a biomassa e o estoque de carbono, para três espécies nativas da Amazônia: Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), Mandioqueira escamosa (*Qualea paraensis* Ducke) e Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl). O estudo foi realizado em uma unidade de manejo florestal da empresa Orsa Florestal, município de Almeirim (00°27'00"S a 01°30'00"S e 51°40'00"W a 53° 20'00"W), com sede em Monte Dourado (PA). A amostragem foi composta por 30 árvores, dez indivíduos de cada espécie. Os troncos das árvores foram cubados pelo método de Smalian em seguida pesados. Foram obtidos os valores de volume obtidos por cubagem rigorosa que se aproxima do valor real (9,7 ± 6,34 m³), biomassa (6,27 ± 4,51 t) e o carbono nos troncos (0,86 ± 0,71 t). As equações 12, 9 e 7 respectivamente, apresentaram o melhor conjunto de medidas de precisão para as três espécies. A amostragem foi suficiente para o ajuste das equações volumétricas e insuficiente para gerar equações de precisão maior que 58% de coeficiente de determinação ajustado para estimar a biomassa, sendo a equação 13, a que apresentou o melhor conjunto de medidas de precisão comparada às demais equações.

Keywords

Volume
Biomass
Carbon
Allometry

The itinerant agriculture or agriculture of cut and burn, presents an area of cultivation, where the cut of the vegetation is made in the dry period and the burning in the beginning of the rainy season. These practices involve the deforestation and burning of vegetation to implement itinerant agriculture in the Amazon region, resulting in soil wear and the emission of harmful gases to the environment. The use of soil management practices that promote greater incorporation of atmospheric carbon and increase productivity (in time and quality), reducing the use of new forest areas for agriculture are essential. Therefore, the objective of this study is to determine the soil management system that provides greater carbon fixation (C) in soils used for subsistence agriculture in the Amazon. The study was conducted in the municipality of Macapá/AP on a private property in the district of São Joaquim do Pacuí (0°48'38"N and 50°45'59"O). The vegetation of the area is characterized as a transition forest between Cerrado and Dense Ombrophylous Forest, with species from 8 to 12 m in height. Sampling was performed in the following treatments: crushed capoeira (T), burnt capoeira first cultivation cycle (Q1), burnt capoeira second cultivation cycle (Q2) and control with capoeira (C). The results obtained for the treatments showed the management systems with crushing of capoeira (T) and burning of capoeira in the first culture cycle (Q1) indicated greater incorporation of total carbon in the soil.

INTRODUÇÃO

Diversos estudos têm sido realizados nas florestas da região amazônica, visando melhorar as equações para as estimativas volumétricas de madeira, e atender às demandas das empresas do setor florestal atuantes na região. As equações resultantes desses estudos, em sua maioria são aplicadas para todas as espécies florestais do povoamento, ao se estimar o volume para uma única espécie, o volume obtido pode estar subestimado ou superestimado, dependendo da espécie. As etapas do manejo florestal baseadas nessas equações, como o planejamento estratégico e a exploração florestal podem influenciar, drasticamente na frequência, densidade e no estoque volumétrico dessas espécies (BARROS; SILVA JÚNIOR 2009).

A redução de algumas espécies em florestas da amazônica pode estar relacionada ao uso de práticas não sustentáveis de exploração influenciando diretamente nas mudanças do clima e na tipologia florestal da região. Uma alternativa para alcançar o uso sustentável dos recursos das florestas tropicais é o emprego de equações volumétricas ajustadas por espécie, favorecendo o rendimento econômico e a manutenção da floresta em pé, proporcionando o acúmulo de biomassa e estoque de carbono florestal. A análise de regressão tem sido uma ferramenta bastante empregada no ajuste de tais equações, relacionando as variáveis biométricas das árvores, permitindo a obtenção indireta de estimativas confiáveis de volume, biomassa e estoque de carbono florestal (SCHNEIDER; SCHNEIDER; SOUZA, 2009).

As estimativas de biomassa florestal também podem ser obtidas através de equações ajustadas com a análise de regressão. A quantificação da biomassa vegetal de uma determinada floresta facilita as tomadas de decisões relacionadas ao uso do solo e a quantidade de nutrientes exportados durante a exploração florestal. Com a estimação da biomassa é possível inferir ainda, sobre o estoque de carbono florestal acumulado em determinados períodos de tempo e a quantidade de carbono que é emitido para a atmosfera com o uso das queimadas (HIGUCHI et al. 1998; HIGUCHI et al. 2004).

O ajuste das equações é feito com as variáveis biométricas obtidas no método direto (destrutivo) onde, faz-se a seleção, o corte, a cubagem rigorosa e pesagem das árvores. Após, o ajuste das equações é possível inserir variáveis como o DAP e HC (DAP= diâmetro a altura do peito 1,30 m do solo, e altura comercial) e estimar o volume e a biomassa, da espécie ou da floresta como um todo, método (indireto não destrutivo). Dessa forma, é possível estimar o volume e a quantidade de biomassa, acumulada em grandes áreas de florestas e até em árvores da mesma espécie (SOARES, NETO e SOUZA, 2011).

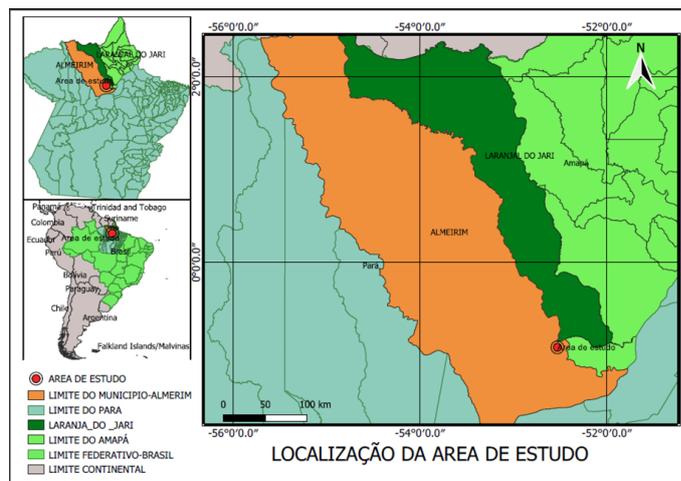
Nesse contexto, este estudo teve como objetivo, o ajuste de equações para a estimação de volume comercial, biomassa e estoque de carbono para subsidiar o manejo florestal sustentável de três espécies nativas da região amazônica: Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), Mandioqueira escamosa (*Qualea paraensis* Ducke) e Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl), espécies frequentes em uma floresta manejada pela empresa Orsa Florestal LTDA no município de Almeirim no estado do Pará.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma unidade de manejo florestal pertencente à empresa Orsa Florestal localizada no município de Almeirim (00°27'00"S a 01°30'00"S e 51°40'00"W a 53° 20'00"W), com sede em Monte Dourado (PA) (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo onde foram coletadas as amostras.



A fitofisionomia da região é caracterizada por Floresta Ombrófila Densa com altura do dossel em torno de 30 a 35 m, sendo que algumas espécies emergentes ao dossel (Angelim vermelho) podem alcançar até 50 m de altura.

O clima na região, conforme a classificação de Köppen é do tipo Amw caracterizado como quente e úmido. A precipitação oscila em torno de 2200 mm anuais, distribuída em duas estações: uma estação chuvosa (dezembro a julho) e uma estação seca (agosto a novembro). A temperatura média anual gira em torno de 26 ± 2 °C (ALVES; MIRANDA, 2008).

Os solos são classificados como Latossolos Amarelos e Podzólicos Vermelho Amarelos, apresentam drenagem e profundidade variadas. A topografia da região possui

características que definem três níveis de relevo, que por sua vez caracterizam a bacia do rio Jarí. O primeiro é o planalto de Maracanaquara (altitude de 400 a 600 m) pertencente à bacia sedimentar do rio Amazonas. O segundo, o baixo planalto amazônico, situa-se ao nível do Pediplano e Pleistocênico. E o terceiro, a planície amazônica, abrange uma faixa da margem do rio Amazonas marcada por canais de drenagem e igarapés (MEDEIROS, 2008; BAUCH; KIKUCHI; PIRES, 2007).

As três espécies foram selecionadas em função do maior volume explorado no ano de 2010. O Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), pertencente à família Fabaceae que compôs 42% do volume total explorado, a Mandioqueira escamosa (*Quelea paraenses* Ducke) da família Vochysiaceae com 9% do volume total explorado e a Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.), família Goupiaceae com 6,13% do volume total explorado, representando 57,13 % do volume retirado das unidades de produção. A amostragem foi composta por 30 árvores, dez indivíduos de cada espécie selecionados considerando o DAP mínimo para o corte 50 cm. Os troncos das árvores foram cubados pelo método Smalian e pesados seguindo a ordem de exploração do cronograma da empresa. Amostras dos troncos foram retiradas para determinação do teor de carbono e umidade.

Para a determinação do volume real dos indivíduos selecionados foram coletadas as seguintes variáveis em todas as árvores: diâmetro a altura do peito (DAP), altura comercial (HC) e altura total (HT) e diâmetro de copa.

Para a obtenção da biomassa, as árvores abatidas foram traçadas (secção das árvores em toras) e as toras transportadas para o pátio da serraria para pesagem (peso úmido). Esta etapa que consistiu na pesagem das toras separadamente por indivíduo, tendo o auxílio de um caminhão com reboque e balança de precisão 10 em 10 kg. No início dessa etapa o caminhão com o tanque de combustível cheio e o reboque foram pesados sem as toras e ao final de cada pesagem, o caminhão era pesado novamente para verificar o seu peso após o consumo de combustível.

Quantificação do carbono na biomassa

Para a quantificação do carbono na biomassa foi utilizada a seguinte equação:

$$C = Pu. \% U. \% C$$

Onde, C = quantidade de carbono em toneladas (t); Pu = biomassa (peso fresco do tronco) em toneladas (t); % U = teor de umidade do tronco; % C = teor de carbono.

Determinação do teor de umidade

Amostras de aproximadamente 500 g foram retiradas de

cada tora, após a pesagem destas, para determinação do teor de umidade. As amostras foram identificadas, embaladas (para evitar a perda de umidade no traslado até o laboratório) e pesadas em balanças de precisão para a obtenção do peso úmido. Em seguida, foram colocadas em estufa a ± 105 °C até peso constante para obtenção do peso seco. O teor de umidade foi obtido a partir da diferença entre o peso úmido e o peso seco dividido pelo peso úmido.

Determinação do teor de carbono

A determinação do teor do carbono foi realizada com amostras de tronco retiradas das 30 árvores selecionadas. Essas amostras foram trituradas e peneiradas (peneiras granulométricas de 5 ϕ) em recipientes forrados com papel alumínio. Em cada amostra o papel alumínio foi trocado para evitar a contaminação do material. O teor de carbono foi determinado conforme o método de digestão úmida Walkley-Black, Embrapa (1999), essa metodologia foi adaptada para analisar o teor de carbono em material vegetal, e realizada a titulação com sulfato ferroso amoniacal. Após esses procedimentos foi realizado o cálculo de teor de carbono pela equação

$$C(\%) = 0,06 \times (40 - V) \times \text{fator.}$$

Onde: C(%) = Teor de carbono; V = volume gasto de solução.

Análise dos dados

O ajuste das equações de volume foi realizado para todas as três espécies conjuntamente, utilizando DAP e/ou HC das 30 árvores selecionadas e por espécie (com as dez árvores de cada espécie (Tabela 1). A seleção dos melhores modelos foi realizada com base no coeficiente de determinação ajustados (R^2_{aj}), no erro padrão da estimativa (Syx) e no coeficiente de variação (Syx%) de cada modelo. Os modelos logarítmicos foram corrigidos por meio do Índice de Furnival possibilitando a comparação com modelos não logarítmicos. Para a avaliação das estimativas volumétricas nos modelos selecionados foi realizado o teste F proposto por Graybill.

A biomassa foi determinada para 27 das 30 árvores selecionadas anteriormente, sendo oito de Angelim vermelho, nove de Mandioqueira escamosa e dez de Cupiúba. Uma árvore de Angelim teve que ser eliminada das análises de biomassa visto que durante a permanência das toras no pátio da serraria algumas toras desta árvore foram desdobradas, por engano, antes de serem pesadas. Outras duas árvores foram excluídas da análise por possuírem biomassa estimada muito distantes da biomassa observada

(foram consideradas outliers).

No ajuste das equações de biomassa foram testados os 12 modelos originalmente utilizados para ajuste de equações volumétricas mais 3 modelos testados por autores da literatura especializada (Tabela 2), que relacionam volume, densidade e peso fresco. Os modelos de 1 a 13 utilizam o peso seco (Ps = biomassa) e de 14 a 15 o peso úmido (Pu).

Para a análise estatística, os dados foram tabulados em planilhas do Microsoft Office Excel e analisados no software Estatística Release 7.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O DAP médio para as três espécies foi de $0,86 \pm 0,21$ m, a altura total (HT) média foi $39,64 \pm 10,2$ m e a altura comercial

(HC) de $20,4 \pm 4,15$ m. A espécie Angelim vermelho apresentou maior DAP, HT e HC, e, portanto, teve o maior volume observado ($15,62 \pm 7,63$ m³). A Cupiúba teve os menores valores de DAP, HT e HC, e foi diferente das demais espécies ($5,42 \pm 1,74$ m³) a Mandioqueira escamosa também de diferenciação das outras espécies ($7,96 \pm 3,29$ m³; Tabela 3).

A biomassa média geral do tronco foi igual a $6,27 \pm 4,51$ t arv⁻¹ (Tabela 4). Por espécie, a biomassa média obtida para o Angelim vermelho ($10,32 \pm 5,91$ t arv⁻¹) foi quase duas vezes maior que a observada para a Cupiúba ($4,7 \pm 2,7$ t arv⁻¹) e Mandioqueira escamosa ($4,8 \pm 0,4$ t arv⁻¹).

O teor de carbono médio do tronco (Tabela 4) foi de $0,36 \pm 0,08$ e não variou entre as espécies. A quantidade de carbono média do tronco foi de $0,86 \pm 0,71$ t C arv⁻¹. Para o Angelim vermelho a quantidade de carbono calculada foi de

Tabela 1. Modelos testados para o ajuste de equações de volume para as espécies Angelim vermelho, Cupiúba e Mandioqueira escamosa; V = Volume (m³); D = DAP (diâmetro altura do peito a 1,30 m de altura); HC = altura comercial (m); Ln = logaritmo natural.

COD.	AUTORES	MODELOS DE VOLUME
1	Kopecky-Gehrhardt	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \epsilon$
2	Hohenadl & Krenn	$V = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 + \epsilon$
3	Husch	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \epsilon$
4	Brenac	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 D^{-1} + \epsilon$
5	Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 HC + \epsilon$
6	Stoate	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 HC + \epsilon$
7	Näslund	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC^2 + \beta_4 HC^2 + \epsilon$
8	Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC + \beta_4 DHC^2 + \beta_5 HC + \epsilon$
9	Meyer modificada	$V = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC + \beta_4 DHC^2 + \epsilon$
10	Logarítm. (Spurr)	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln (D^2 HC) + \epsilon$
11	Logarítm. (Schumacher e Hall)	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln HC + \epsilon$
12	Logarítm. De Prodan	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln (D) + \beta_2 \ln^2(D) + \beta_3 \ln (HC) + \beta_2 \ln (D^2) + \epsilon$

Tabela 2. Modelos testados para o ajuste de equações de biomassa para Angelim vermelho, Cupiúba e Mandioqueira escamosa, espécies manejadas pela Orsa florestal, Almerim, PA.

COD.	AUTORES	MODELOS DE BIOMASSA
1	Kopecky-Gehrhardt	$Ps = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \epsilon$
2	Hohenadl & Krenn	$Ps = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 + \epsilon$
3	Husch	$\ln Ps = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \epsilon$
4	Brenac	$\ln Ps = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 D^{-1} + \epsilon$
5	Spurr	$Ps = \beta_0 + \beta_1 D^2 HC + \epsilon$
6	Stoate	$PS = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 HC + \epsilon$
7	Näslund	$Ps = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC^2 + \beta_4 HC^2 + \epsilon$
8	Meyer	$PS = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC + \beta_4 DHC^2 + \beta_5 HC + \epsilon$
9	Meyer modificada	$Ps = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 D^2 HC + \beta_3 DHC + \beta_4 DHC^2 + \epsilon$
10	Logarítm. (Spurr)	$\ln Ps = \beta_0 + \beta_1 \ln (D^2 HC) + \epsilon$
11	Logarítm. (Schumacher e Hall)	$\ln Ps = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln HC + \epsilon$
12	Logarítm. De Prodan	$\ln Ps = \beta_0 + \beta_1 \ln (D) + \beta_2 \ln^2(D) + \beta_1 \ln (HC) + \beta_2 \ln (D^2) + \epsilon$
13	Vidal	$Ps = \beta_0 + \beta_1 V * Dbm; \text{ ou } BIO = \beta_0 + \beta_1 V * Dbc$
14	West, Brown e Enquist	$\ln Pu = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \epsilon$
15	Logarítm. (Schumacher e Hall)	$\ln Pu = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln HC + \epsilon$

1,04 ± 0,74 t C arv⁻¹, enquanto que para a Cupiúba (0,51 ± 0,90 t C arv⁻¹) e para a Mandioqueira escamosa (0,77 ± 0,47 t C arv⁻¹).

A equação 12 apresentou o melhor ajuste (R²aj = 0,82; Syx = 0,39; Syx% = 4,01), considerando as medidas de precisão avaliadas, para o conjunto de dados referente às três espécies (Tabela 5). Nessa ordem, as equações 7, 9 e 1 também apresentaram resultados satisfatórios. A equação 5 foi a de menor precisão no ajuste (R²aj = 0,69; Syx = 0,65; Syx% = 1,23).

Por espécie, a equação 10 obteve o ajuste de maior precisão (R²aj = 0,69; Syx = 1,34; Syx% = 8,59), para o Angelim vermelho, seguida das equações 3 e 4 (Tabela 6). A equação 8 foi a de menor precisão no ajuste (R²aj = 0,31; Syx = 2,59; Syx% = 5,23).

A equação 9 foi a que apresentou maior precisão (R²aj = 0,84; Syx = 0,28; Syx% = 1,64), para a espécie Cupiúba, seguida das equações 8 e 12 (Tabela 7). Em contrapartida, a equação 3 teve a menor precisão no ajuste (R²aj = 0,17; Syx = 0,50; Syx% = 9,30).

Em relação à espécie Mandioqueira escamosa, a equação 3 foi a de maior precisão (R²aj = 0,56; Syx = 0,53; Syx% = 6,70), seguida das equações 1, 2 e 11 (Tabela 9). A equação 12 foi a de menor precisão no ajuste (R²aj = 0,34; Syx = 0,80; Syx% = 10,09).

A equação 13 apresentou os melhores resultados (R²aj = 0,58; Syx = 571,17; Syx% = 1,80;) para o ajuste das equações de biomassa (Tabela 9). As equações ajustadas apenas com o DAP apresentaram resultados iguais ou melhores que, as ajustadas com DAP e HC. Além disso, a análise da distribuição

Tabela 3. Médias de diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (HT), altura comercial (HC), volume e biomassa real das três espécies amostradas (médias ± erro padrão, n = 10).

ESPÉCIE	DAP		HT		HC		Volume real do tronco m ³	
	-----m-----							
Angelim vermelho	1,06 ± 0,26	a	46,1 ± 6,8	a	22,6 ± 4,0	a	22,6 ± 4,0	a
Cupiúba	0,76 ± 0,12	b	32,1 ± 9,7	b	19,15 ± 4,38	b	19,15 ± 4,38	b
Mandioqueira escamosa	0,79 ± 0,10	b	40,0 ± 8,5	ab	19,05 ± 3,65	ab	19,05 ± 3,65	c
Média geral	0,86 ± 0,21		39,6 ± 10,2		20,4 ± 4,15		20,4 ± 4,15	

*Letras iguais na coluna não se diferenciam pelo teste t a 95 % de probabilidade.

Tabela 4. Médias do teor de umidade, teor de carbono, peso, carbono e biomassa do tronco três espécies amostradas em Almerim, PA.

ESPÉCIE	Umidade		Teor de carbono		Peso do tronco		Carbono do tronco		Biomassa do tronco	
	-----%-----									
Angelim vermelho	0,20 ± 0,03	a	0,39 ± 0,07	a	13,00 ± 7,6	a	1,04 ± 0,74	a	10,32 ± 5,9	A
Cupiúba	0,21 ± 0,25	a	0,35 ± 0,07	a	6,35 ± 5,65	a	0,51 ± 0,90	a	4,69 ± 2,75	B
M. escamosa	0,31 ± 0,05	a	0,38 ± 0,08	a	6,48 ± 2,86	a	0,77 ± 0,47	a	4,79 ± 0,39	B
Média geral	0,24 ± 0,16		0,36 ± 0,08		8,37 ± 5,77		0,86 ± 0,71		6,27 ± 4,51	

*Letras iguais na coluna não se diferenciam pelo teste t a 95 % de probabilidade.

Tabela 5. Equações volumétricas ajustadas para as três espécies amostradas em Almerim, PA. F = valor de F calculado, R²aj = coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão de estimativa, Syx% = coeficiente de variação

CO	Equações	F	R ² aj	Syx	Syx%
1	V = - 0,97348 + 0,00138 D ² + ε	106,33	0,78	0,55	1,03
2	V = - 0,87700 - 0,00209D + 0,00139 D ² + ε	51,27	0,78	0,57	1,07
3	LnV = - 7,42941 + 2,15537 Ln D + ε	82,17	0,74	0,44	4,54
4	LnV = - 15,60987 + 3,63616 Ln D + 132,83240 D ⁻¹ + ε	40,40	0,73	0,45	4,67
5	V = 1,49877 + 0,00005 D ² HC + ε	66,08	0,69	0,65	1,23
6	V = - 0,79117 + 0,00036 D ² + 0,00104D ² HC + 0,00001HC + ε	35,82	0,78	0,55	1,03
7	V = - 1,60158 + 0,00014 D ² + 0,01738D ² HC + 0,00009DHC ² - 0,00031HC ² + ε	30,35	0,80	0,55	1,05
8	V = - 69,1989 + 1,4472 D ² + 0,0065D ² HC - 0,0787DHC + 0,0004DHC ² + 3,7222HC + ε	22,75	0,79	1,30	6,82
9	V = 4,697659 - 0,165334 D ² + 0,001749D ² HC + 0,002793DHC + 0,00004DHC ² + ε	28,65	0,79	0,57	1,07
10	LnV = - 7,95124 + 0,84738 Ln (D ² HC) + ε	98,84	0,77	0,41	4,23
11	LnV = - 8,25292 + 1,97901 Ln D + 0,53099 Ln HC + ε	55,95	0,79	0,40	4,11
12	LnV = - 3,98554 - 3,06820 Ln (D) + 5,18217 Ln ² (D) 0,55471 Ln (HC) - 0,74741 Ln (D ²) + ε	33,21	0,82	0,39	4,01

dos resíduos também demonstrou que todos os modelos superestimaram os valores menores e subestimaram valores maiores.

Os resultados para o erro padrão da estimativa (Syx) foram elevados em todas as equações, variando de 678,08 a 2114,11. O erro padrão da estimativa Syx% indicou que, as equações logarítmicas apresentaram os maiores desvios em relação às médias observadas, quando comparadas às equações não logarítmicas. Nesse sentido, as equações na forma logarítmica apresentaram os piores resultados, em relação às outras equações.

O ajuste das equações para o conjunto das três espécies foi satisfatório. A análise das medidas de precisão, demonstraram que as equações 12, 7 e 9 podem ser utilizadas na estimação de volume para essas três espécies (Tabela 6). Ainda assim, a equação 1 é uma alternativa a ser considerada pelo tomador de decisão, por necessitar apenas da variável DAP, o que agiliza a coleta de dados em campo, quando

houver necessidade de estimativas de volume em um curto período de tempo.

Em estudo para estimar volume com e sem casca de várias espécies, entre elas a Angelim vermelho, em uma Floresta Ombrófila Densa no estado de Mato Grosso, Colpini et al. (2009), observaram que a equação baseada no modelo logarítmico de Prodan estava entre as que apresentaram os melhores resultados, para o ajuste. Entretanto, os autores destacaram que equações ajustadas seguindo esse modelo podem subestimar o volume, quando comparada a equações que foram ajustadas seguindo o modelo de Schumacher e Hall.

Com base nos resultados, a equação 10 é a mais indicada para a estimação do volume da espécie Angelim vermelho (Tabela 6). Essa equação foi a que melhor se ajustou aos dados, no entanto, seu ajuste não foi superior a 69 % para o coeficiente de determinação ajustado (R²aj). A dificuldade observada, na obtenção de equações com melhor precisão,

Tabela 6. Equações volumétricas ajustadas para a espécie Angelim vermelho. F = valor de F calculado, R²aj = coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão de estimativa, Syx% = coeficiente de variação.

CO	Equações	F	R ² aj	Syx	Syx%
1	$V = 1,36235 + 0,00123 D^2 + \epsilon$	15,23	0,61	1,58	3,21
2	$V = - 0,62160 + 0,01530D + 0,00116 D^2 + \epsilon$	6,66	0,56	1,80	3,63
3	$\text{Ln}V = - 5,24877 + 1,70378 \text{Ln} D + \epsilon$	19,40	0,67	1,38	8,80
4	$\text{Ln}V = - 13,18716 + 3,13144 \text{Ln} D + 132,07500 D^{-1} + \epsilon$	8,70	0,63	1,55	9,90
5	$V = 1,78773 + 0,00005 D^2 \text{HC} + \epsilon$	14,01	0,59	1,63	3,29
6	$V = - 5,72044 + 0,30343 D^2 + 0,00118 D^2 \text{HC} + 0,00001 \text{HC} + \epsilon$	4,30	0,52	1,99	4,03
7	$V = 4,33675 - 0,00490 D^2 + 0,7794 D^2 \text{HC} + 0,00049 \text{DHC}^2 - 0,00185 \text{HC}^2 + \epsilon$	4,17	0,58	0,83	1,69
8	$V = - 89,5276 + 1,7426 D^2 - 0,0076 D^2 \text{HC} - 0,1001 \text{DHC} + 0,00005 \text{DHC}^2 + 5,0836 \text{HC} + \epsilon$	1,81	0,31	2,59	5,23
9	$V = 12,3017 - 0,2875 D^2 + 0,00215 D^2 \text{HC} + 0,00022 \text{DHC} + 0,00001 \text{DHC}^2 + \epsilon$	2,76	0,44	2,34	4,73
10	$\text{Ln}V = -7,34229 + 0,80606 \text{Ln} (D^2 \text{HC}) + \epsilon$	20,80	0,69	1,34	8,59
11	$\text{Ln}V = - 14,77044 + 0,02697 \text{Ln} D - 0,35463 \text{Ln} \text{HC} + \epsilon$	4,67	0,62	1,57	10,05
12	$\text{Ln}V = - 20,00410 - 9,50494 \text{Ln} (D) + 25,50494 \text{Ln}^2(D) + 1,24666 \text{Ln} (\text{HC}) - 4,01307 \text{Ln} (D^2) + \epsilon$	4,60	0,62	1,82	11,67

Tabela 7. Equações volumétricas ajustadas para a espécie Cupiúba. F = valor de F calculado, R²aj = Coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão de estimativa, Syx% = coeficiente de variação.

CO	Equações	F	R ² aj	Syx	Syx%
1	$V = - 3,94296 + 0,00176 D^2 + \epsilon$	5,53	0,33	0,47	2,76
2	$V = 222,96639 - 6,02421 D + 0,04158 D^2 + \epsilon$	5,14	0,48	0,44	2,59
3	$\text{Ln}V = - 10,79737 + 2,90232 \text{Ln} D + \epsilon$	2,82	0,17	0,50	9,18
4	$\text{Ln}V = - 397,34258 + 75,54575 \text{Ln} D + 5457,63194 D^{-1} + \epsilon$	2,43	0,24	0,50	9,30
5	$V = - 0,19378 + 0,00006 D^2 \text{HC} + \epsilon$	13,43	0,58	0,38	2,19
6	$V = - 11,55978 + 0,38561 D^2 + 0,00239 D^2 \text{HC} - 0,00003 \text{HC} + \epsilon$	6,01	0,63	0,40	2,35
7	$V = - 11,76234 + 0,00052 D^2 + 0,09519 D^2 \text{HC} + 0,00027 \text{DHC}^2 - 0,00178 \text{HC}^2 + \epsilon$	5,56	0,67	0,41	2,38
8	$V = 199,0227 - 5,6444 D^2 + 0,0401 D^2 \text{HC} + 0,0001 \text{DHC} - 0,00001 \text{DHC}^2 + 0,05002 \text{HC} + \epsilon$	13,14	0,84	0,31	1,80
9	$V = 280,2090 - 5,8947 D^2 + 0,0418 D^2 \text{HC} - 0,0136 \text{DHC} - 0,0001 \text{DHC}^2 + \epsilon$	13,13	0,84	0,28	1,64
10	$\text{Ln}V = - 9,97103 + 1,01478 \text{Ln} (D^2 \text{HC}) + \epsilon$	20,20	0,68	0,31	5,69
11	$\text{Ln}V = - 14,11616 + 3,06360 \text{Ln} D + 0,91457 \text{Ln} \text{HC} + \epsilon$	10,87	0,69	0,32	5,97
12	$\text{Ln}V = 526,13200 - 250,77012 \text{Ln} (D) + 7,20013 \text{Ln}^2(D) + 29,32997 \text{Ln} (\text{HC}) - 1,11222 \text{Ln} (D^2) + \epsilon$	10,52	0,81	0,29	5,39

pode estar relacionada com o baixo número de amostras utilizadas (n=10), e também à deformação observada na base dos indivíduos dessa espécie (sapopema).

Leite e Rezende (2010) ajustaram equações seguindo os modelos de Husch e Kopecky-Gehrhardt somente com o diâmetro da cepa (toco), obtendo equações volumétricas para várias espécies de valor comercial da floresta amazônica, apresentando bons resultados para as medidas de precisão (n = 113; R²aj = 0,77; 0,76; Syx = 1,85; 1,86; Syx% = 21,65; 21,75, respectivamente) indicando que, o maior número amostras em diferentes classes diamétricas, pode favorecer de equações ajustadas somente com o DAP.

Para a floresta nacional de Tapirapé-Aquirí, também caracterizada como floresta ombrófila densa, em Serra dos Carajás no estado do Pará, é possível a estimação do volume de diferentes espécies de valor comercial, com equações ajustadas somente com o DAP. Porém, Rolim et al. (2006) utilizando 55 indivíduos de diferentes espécies ajustaram equações seguindo o modelo de Schumacher e Hall apresentando resultados satisfatórios (R²aj = 0,994; Syx = 0,11; Syx% = 4,68; n = 55).

Para a Cupiúba (Tabela 7) as equações 8 e 9 são as indicadas para a estimação do volume. Com a inclusão da variável altura (HC) no ajuste e com maior número de

Tabela 8. Equações volumétricas ajustadas para a espécie Mandioqueira escamosa. F = valor de F calculado, R²aj = Coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão de estimativa, Syx% = coeficiente de variação.

CO	Equações	F	R ² aj	Syx	Syx%
1	$V = 2,03355 + 0,00094D^2 + \epsilon$	11,26	0,53	0,54	2,14
2	$V = -18,65131 + 0,52726D - 0,00235D^2 + \epsilon$	5,75	0,51	0,58	2,32
3	$\text{Ln}V = -4,98964 + 1,61214 \text{Ln} D + \epsilon$	12,59	0,56	0,53	6,70
4	$\text{Ln}V = 3,42420 + 0,04094 \text{Ln} D - 121,05244 D^{-1} + \epsilon$	5,59	0,50	0,60	7,56
5	$V = 3,24570 + 0,00004D^2 \text{HC} + \epsilon$	6,56	0,38	0,62	2,46
6	$V = -4,58278 + 0,33022D^2 + 0,00201D^2\text{HC} - 0,00005\text{HC} + \epsilon$	2,97	0,40	0,69	2,76
7	$V = -6,94625 + 0,00770D^2 - 0,04861D^2\text{HC} + 0,00056D\text{HC}^2 - 0,00176\text{HC}^2 + \epsilon$	3,15	0,49	0,69	2,74
8	$V = -291,580 + 6,842D^2 - 0,038D^2\text{HC} - 0,281D\text{HC} + 0,002D\text{HC}^2 + 12,210\text{HC} + \epsilon$	2,47	0,45	0,78	3,12
9	$V = -42,6889 - 0,6146D^2 + 0,0005D^2\text{HC} + 0,0264D\text{HC} - 0,0003D\text{HC}^2 + \epsilon$	2,96	0,46	0,71	2,80
10	$\text{Ln}V = -3,05417 + 0,43193 \text{Ln} (D^2\text{HC}) + \epsilon$	6,69	0,39	0,60	7,52
11	$\text{Ln}V = -5,12547 + 1,55740 \text{Ln} D + 0,12215 \text{Ln} \text{HC} + \epsilon$	5,88	0,52	0,59	7,44
12	$\text{Ln}V = -23,29700 + 10,10496 \text{Ln} (D) - 0,11992 \text{Ln}^2(D) - 0,98313 \text{Ln} (\text{HC}) + 0,03750 \text{Ln} (D^2) + \epsilon$	2,15	0,34	0,80	10,09

Tabela 9. Equações de biomassa ajustadas para a espécie Angelim vermelho, Cupiúba e Mandioqueira escamosa. F = valor de F calculado, R²aj = Coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão de estimativa, Syx% = coeficiente de variação.

CO	EQUAÇÕES AJUSTADAS	F	R ² aj	Syx	Syx%
1	$P_s = 51,630 + 0,822 D^2 + \epsilon$	29,55	0,52	609,32	1,91
2	$P_s = 23433,455 - 509,243D + 3,416 D^2 + \epsilon$	18,47	0,57	587,88	1,85
3	$\text{Ln}P_s = 1,554 + 1,585 \text{Ln} D + \epsilon$	0,25	0,31	505,48	8,10
4	$\text{Ln}P_s = -40,900 + 9,272 \text{Ln} D + 687,735 D^{-1} + \epsilon$	8,66	0,37	492,31	7,89
5	$P_s = 1478,437 + 0,030 D^2 \text{HC} + \epsilon$	19,05	0,41	678,08	2,13
6	$P_s = -4070,977 + 1,443D^2 - 0,029D^2\text{HC} + 200,080\text{HC} + \epsilon$	9,51	0,50	652,51	2,05
7	$P_s = 3135,611 - 1,875 D^2 + 0,233D^2\text{HC} - 0,914D\text{HC}^2 + 33,985\text{HC}^2 + \epsilon$	7,71	0,51	658,16	2,07
8	$P_s = 11080,284 - 240,074 D^2 + 2,054D^2\text{HC} - 13,610D\text{HC} + 0,070D\text{HC}^2 + 620,422\text{HC} + \epsilon$	6,47	0,51	669,73	2,10
9	$P_s = 23182,772 - 506,494 D^2 + 3,434D^2\text{HC} + 0,123D\text{HC} - 0,002D\text{HC}^2 + \epsilon$	8,47	0,53	640,12	2,01
10	$\text{Ln}P_s = 1,298 + 0,613 \text{Ln} (D^2\text{HC}) + \epsilon$	10,33	0,26	522,08	8,37
11	$\text{Ln}P_s = 1,414 + 1,571 \text{Ln} D + 0,067 \text{Ln} \text{HC} + \epsilon$	6,11	0,28	525,89	8,43
12	$\text{Ln}P_s = 59,273 - 31,052 \text{Ln} (D) + 3,623 \text{Ln}^2(D) + 10,710 \text{Ln} (\text{HC}) - 1,831 \text{Ln} (D^2) + \epsilon$	4,34	0,34	525,85	8,43
13	$P_s = 1953,430 + 0,623 V \text{DB}$	37,08	0,58	571,17	1,80

parâmetros na equação, o ajuste da equação para essa espécie apresentou bons resultados. No entanto, para a espécie Mandioqueira escamosa (Tabela 8) os modelos ajustados de forma geral apresentaram coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}) com valores baixos, mesmo utilizando DAP e HC nos parâmetros das equações. Estudos com maior intensidade amostral podem ser realizados para obtenção de equações de maior precisão.

A equação 13 foi a que apresentou os melhores resultados no ajuste para a estimativa de biomassa, esses resultados podem estar relacionados com o número de amostras utilizadas ($N = 27$) e com a variabilidade das espécies, tanto em dimensão quanto na densidade básica ($kg \cdot m^{-3}$). Os resultados do modelo (13) foram influenciados pela densidade básica combinada ao volume. Equações ajustadas com a variável densidade, associada ou não a outra variável, como o volume, por exemplo, podem utilizadas na estimação da biomassa. Nesse sentido, para que as equações ajustadas sejam consistentes e confiáveis de forma que possam estimar a biomassa com precisão é necessário um maior número de amostras de cada espécie que possam representar a variabilidade das espécies.

Diversos estudos (HIGUCHI; CARVALHO Jr., 1994; HIGUCHI et al., 1998; HIGUCHI et al. 2004; SIVEIRA, 2008; MIRANDA; MELO; SANQUETTA 2011) realizados para estimar a biomassa e o estoque de carbono florestal acima e a baixo do solo, tem utilizado um elevado número de amostras. Higuchi et al. (1998) ajustando equações para estimar biomassa de árvores em pé, utilizaram diferentes conjuntos de dados com 71 arvores ($R^2 = 0,92$; $Syx = 1159$) 244 árvores ($R^2_{aj} = 0,94$; $Syx = 31$) e 315 árvores ($R^2 = 0,94$; $Syx = 540$). O que confirma que um número de amostras maior possibilita a obtenção de resultados consistentes no ajuste dessas equações.

CONCLUSÕES

As equações 12, 7 e 9 foram os que melhor se ajustaram aos dados, por isso, são indicadas para estimar o volume para o conjunto das três espécies.

A utilização da variável altura melhorou a precisão das equações volumétricas principalmente para as espécies Angelim vermelho e Cupiúba.

O número de amostras utilizadas influenciou diretamente no baixo desempenho no ajuste de equações para a estimativa de biomassa.

Para o ajuste de equações que estimem a biomassa de forma confiável é necessário um número maior de amostras.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. C. Z. O.; MIRANDA, I. S. Análise da estrutura de comunidades arbóreas de uma floresta amazônica de Terra Firme aplicada ao manejo florestal. *Acta Amazônica*, Manaus-AM, v. 38, n 4, p 657-666, 2008.
- BAUCH, R. E.; KIKUCHI, M.Y. e PIREZ, J.S.R. Avaliação de certificação do manejo florestal das florestas naturais da Orsa Florestal S/A no Estado do Pará, Brasil. Atualizado em outubro de 2007, 148p. Certificado registrado sob o número SCS-FM/COC-00075N. Disponível em www.scs-certified.com
- COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; T. S.; SILVA V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazônica*, Manaus-AM, v. 39 n , p 97-104, 2009.
- FRANCO C. A.; ESTEVES. L. T.; . SANTOS. R. A.; SILVA Z. P. G. Manejo florestal empresarial no acre: custos da atividade pré-exploratória na floresta estadual do antimary. Rio Branco-AC. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Acre, p 13, 2008
- HIGUCHI, N.; CARVALHO JR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. Em: Emissão x Sequestro de CO₂ - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil. CVRD. pp. 125-153, 1995.
- HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da floresta tropical umidade terra firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, Manaus-AM, v 28, n 2, p. 153-166, 1998
- HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M. ; SILVA, DA R. P. ; ROCHA R. DE M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia central. *Floresta*, Curitiba-PR, v 34, n 3, p. 295-304, 2004.
- LEITE, F. S.; REZENDE A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 71-82, 2010.
- MEDEIROS, R. M. Estratificação volumétrica e crescimento de uma floresta ombrófila densa, município de Almeirim, estado Pará. 2008. Dissertação (ciências florestais) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2008.
- MIRANDA, D. L. C.; MELO, A. C. G.; SANQUETTA, C. R. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.35, n.3, p.679-689, 2011
- ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). *Acta Amazônica*,

- Manaus-AM, V. 36, n 1, p 107-114, 2006.
- SILVA, R. P. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus-AM. 2007. Dissertação (biodiversidade tropical e recursos naturais) Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus-AM, 2007.
- SILVEIRA, P. Ajuste de modelos matemáticos para estimar biomassa aérea em floresta ombrófila densa. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 39, n. 4, p. 743-752, 2009.
- SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. Dendrometria e inventário florestal. In: Biomassa e carbono. Viçosa: 2011, p 97-112.
-

Submissão: 18/09/2019

Aprovado para publicação: 30/10/2019