

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**MODELAGEM BIOMÉTRICA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS A
PARTIR DO LIDAR EM ÁREA DE MANEJO DE PRECISÃO EM
FLORESTAS TROPICAIS NA AMAZÔNIA OCIDENTAL**

Evandro Orfanó Figueiredo

Manaus, Amazonas
Outubro, 2014

EVANDRO ORFANÓ FIGUEIREDO

**MODELAGEM BIOMÉTRICA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS A
PARTIR DO LIDAR EM ÁREA DE MANEJO DE PRECISÃO EM
FLORESTAS TROPICAIS NA AMAZÔNIA OCIDENTAL**

Philip Martin Fearnside
Orientador

Tese apresentada ao Instituto Nacional de
Pesquisas da Amazônia como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor
em Ciências de Florestas Tropicais

Manaus, Amazonas
Outubro, 2014

EVANDRO ORFANÓ FIGUEIREDO

**MODELAGEM BIOMÉTRICA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS A
PARTIR DO LIDAR EM ÁREA DE MANEJO DE PRECISÃO EM
FLORESTAS TROPICAIS NA AMAZÔNIA OCIDENTAL**

Tese apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências de Florestas Tropicais

APROVADA: 06 de outubro de 2014

Banca examinadora:

Dr. Joaquim dos Santos (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia)

Dr. Jochen Schoengart (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia)

Dr. Florian Wittmann (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia)

Dra. Kátia Emídio da Silva (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa)

Dr. Gil Vieira (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia)

F471m Figueiredo, Evandro Orfanó
Modelagem biométrica para árvores individuais a partir do
LIDAR em área de manejo de precisão em florestas tropicais na
Amazônia Ocidental / Evandro Orfanó Figueiredo. --- Manaus:
[s.n.], 2014.
xiv, 86 f. : il. color.

Tese (Doutorado) --- INPA, Manaus, 2014.
Orientador : Philip Martin Fearnside.
Área de concentração : Manejo Florestal e Silvicultura.

1.Volumetria. 2.Morfometria da copa. 3.Biomassa florestal.
I. Título.

CDD 634.9285

Sinopse:

Foram estudadas as variáveis morfométricas da copa obtidas pelo perfilamento com o LIDAR aerotransportado, visando ao desenvolvimento de modelos volumétricos, de área de impacto de clareira e da biomassa do fuste. As metodologias utilizadas e/ou adaptadas para o processamento da nuvem de pontos, conjuntamente com os resultados alcançados, demonstram a viabilidade do emprego de técnicas de perfilamento florestal associadas ao uso de variáveis morfométricas das copas para o aperfeiçoamento do planejamento florestal em áreas de manejo de precisão.

Palavras-chave: perfilamento a laser, análise de regressão, volumetria, clareira, biomassa florestal, morfometria da copa.

DEDICO

A Deus, por me guiar e acolher a qualquer tempo.

A minha amada esposa e companheira, Symone, pelo amor e carinho.

A minha filhotinha, Anne, pelo enorme carinho e cuidado com seu papai.

A minha mãe, Tereza, pela paciência em acolher em sua casa dois doutorandos.

Ao meu pai, Figueiredo (*in memoriam*), pelos ensinamentos que ficam para sempre, dos quais somente um pai é capaz.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por tudo que fizeram por mim.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), por proporcionar minha qualificação e total apoio para a realização dos trabalhos.

À Fundação de Tecnologia do Acre (FUNTAC), por financiar parte da coleta de dados.

Ao colega Dr. Marcus Vinicio Neves d'Oliveira por partilhar a base de dados da Floresta Estadual do Antimary (FEA), bem como me auxiliar com seu vasto conhecimento na área florestal.

Aos colegas Dr. Evaldo Muñoz Braz, Dr. Thiago Augusto da Cunha e ao Engenheiro Florestal Daniel de Almeida Papa pelas boas críticas e opiniões.

Ao professor Philip Martin Fearnside, pela aceitação na orientação de minha tese.

Aos professores do CFT/Inpa, cujos ensinamentos serão de significativa importância para meu desenvolvimento profissional.

A empresa Laminados Triunfo Ltda. pelo completo apoio para realização deste trabalho.

Ao amigo Salomão de Souza Costa, por auxiliar na cubagem das toras e controle de informações de campo.

Aos meus irmãos, Gustavo e Lilian, pelo sempre pronto apoio a minha querida mãe, seja em Rio Branco ou Campinas.

A minha querida família acriana/paraibana: Jediel, Marlene, Paulo, João (Bola), Marizete, Socorro, Júnior e Daniel, pelo carinho e alegria.

Aos colegas da pós-graduação pelos bons momentos de amizade e companheirismo.

Aos colegas Airton do Nascimento Farias e Josivaldo da Silva Saraiva, pela valiosa ajuda na coleta dos dados.

À Symone, minha amada esposa, por sua companhia, amor, carinho e sua valiosa dedicação em todas as nossas conquistas.

RESUMO GERAL

Os estudos realizados nesta tese visam obter equações para estimativa do volume do fuste, impacto de clareiras e biomassa do fuste de árvores codominantes e dominantes cortadas em condições de manejo florestal de precisão. Para isso, foram utilizadas variáveis morfométricas das copas das árvores obtidas por meio do LIDAR aerotransportado. A área de estudo pertence à Floresta Estadual do Antimary (FEA), localizada no município do Bujari, no Estado do Acre, Brasil. Assim, os estudos foram segmentados em três capítulos. O primeiro teve como objeto a construção de equações capazes de estimar o volume do fuste de árvores individuais considerando duas situações de inventário florestal: a) com a coleta da variável diâmetro à altura do peito (DAP), conjuntamente com as variáveis morfométricas da copa obtidas pelo LIDAR e b) apenas com os dados de morfometria da copa. Para seleção dos modelos foram consideradas a matriz de correlação das variáveis preditoras e a combinação das variáveis que geraram os melhores resultados estatísticos pelos critérios S_{yx} , $S_{yx}(\%)$ e $Press_p$, e que foram homocedásticos e com disposição dos resíduos normais e independentes. Para as melhores equações foi realizada análise de influência. Os resultados estatísticos do ajuste dos modelos para as duas situações permitiram selecionar equações com e sem DAP, com resultados $R^2_{aj}(\%)$ de a) 92,92 e b) 79,44; $S_{yx}(\%)$ de a) 16,73 e b) 27,47; e, critério de $Press_p$ de a) 201,15 m⁶ e b) 537,47 m⁶, respectivamente. O segundo capítulo descreve os estudos para estimar as áreas de clareiras de árvores individuais codominantes e dominantes cortadas em manejo, visto que essa importante informação é negligenciada no procedimento de planejamento florestal e sua análise prévia é um importante instrumento para seleção de árvores que possam maximizar o volume e reduzir os impactos sobre a cobertura florestal. Em duas oportunidades distintas, foi realizado o perfilamento florestal em uma unidade de produção anual: a primeira, dias antes do início da exploração florestal e a segunda, após a conclusão das atividades. Com mensurações de campo e processamento da nuvem de pontos do LIDAR, foram obtidas variáveis dendrométricas e de morfometria da copa para desenvolver equações visando estimar a área de clareira. Foi empregado o método de todos os modelos possíveis, considerando a inclusão de 2 a 4 parâmetros, sendo que, previamente, foram avaliadas as variáveis explicativas com maior correlação com a clareira. Foram selecionadas dez equações e, destas, duas foram indicadas para uso, com R^2_{aj} superior a 75%, S_{yx} menor que 23%, somatória dos resíduos tendendo a zero e distribuição gráfica dos resíduos sem tendências. O terceiro e último capítulo apresenta o desenvolvimento de modelos alométricos para estimar as biomassas seca e verde estocadas nos fustes de árvores dominantes e codominantes. O método foi a seleção de todos os modelos possíveis e o teste de identidade de modelos, de maneira a considerar os distintos grupos de densidade básica da madeira (baixa, média e alta). As variáveis morfométricas de copa apresentaram alto poder explicativo da biomassa do fuste e podem constituir equações alométricas associadas ou não com a variável DAP. Quando se pondera a biomassa do fuste de acordo com a densidade básica da madeira, a melhor estimativa é obtida usando equações alométricas com as variáveis de morfometria da copa e o DAP. Para formar um único grupo que envolva as três classes de

densidade básica, deve-se adotar exclusivamente variáveis explicativas de copa ou incorporar, para o caso de biomassa seca, as variáveis densidade básica (DB) e altura total (Ht). Por meio das variáveis morfométricas das copas obtidas com o LIDAR aerotransportado foi possível desenvolver equações capazes de estimar com precisão a área de clareiras, volume e a biomassa do fuste de árvores dominantes e codominantes em florestas tropicais, o que demonstra o potencial do uso do perfilamento florestal para a melhoria do manejo de precisão.

ABSTRACT

The studies in this thesis aim to obtain equations for estimating bole volume, impact of gaps and bole biomass of dominant and codominant trees cut under conditions of precision forest management. These equations used morphometric variables of the canopy obtained by the airborne LIDAR. The study area is in the Antimary State Forest (FEA), located in the municipality of Bujari in the state of Acre, Brazil. The studies were grouped into three chapters. The first has as its object the construction of equations for estimating the bole volume of individual trees considering two situations of forest inventory: a) with the collection of diameter at breast height (DBH), and crown morphometric variables obtained from LIDAR data and b) using only the crown morphometry variables. For the selection of models the factors considered were: the correlation matrix of predictor variables and the combination of variables that generates the best results by statistical criteria S_{yx} , S_{yx} (%) and $Press_p$, and that were homoscedastic and had normal and independent distributions of errors. Influence analysis was performed for the best equations. Results for the statistical fit of the equations for the two situations allowed selection of models with and without DBH, with R^2_{aj} (%) values of a) 92.92 and b) 79.44, S_{yx} (%) values of a) 16.73 and b) 27.47, and, $Press_p$ criterion values of a) 201.15 m⁶ and b) 537.47 m⁶, respectively. The second chapter describes the studies for estimating the areas of gaps of individual dominant and codominant trees, since this information is neglected in the forest planning process and its prior analysis is an important tool for selection of trees that can maximize the forest volume maintained and reduce the impacts on forest cover. On two separate occasions profiles were made in an annual forest-production unit in the Antimary State Forest (FEA). The first was carried out a few days before the start of logging and the second was done after completion of harvest activities. With field measurements and processing of the cloud of LIDAR points, dendrometric and morphometric variables were obtained for the canopy in order to develop equations for estimating gap areas. After evaluation of the explanatory variables with the highest correlations with gap area, the method used considering all possible models and including 2-4 parameters. Ten equations were selected, of which two were chosen for use; these had $R^2_{aj} > 75\%$, $S_{yx} < 23\%$, the sum of the residuals tending to zero and a graph of the distribution of the residuals indicating no bias. The third and final chapter presents the development of allometric models for estimating green and dry biomass stored in the boles of dominant and codominant trees. The method used selected from among all possible models and performed identity testing of models in order to consider the different groups of basic wood density (low, medium and high). The morphometric variables of the crown showed high explanatory power for predicting bole biomass and allometric equations can be associated or not with varying DBH. When considering bole biomass according to the basic wood density, the best estimate is obtained using allometric equations with variables on both morphology of crown and DBH. To form a single group involving the three classes of basic density, one must adhere exclusively the explanatory variables represent the crown, or, in the case of dry biomass, variables basic density (DB) and total height (Ht). By of morphometric variables of the tree crown obtained with the airborne LIDAR it was possible to develop equations capable of accurately estimating the area of gap and the volume and bole biomass of dominant and codominant trees in tropical forests, which demonstrates the potential of using forest profiling for improving precision management.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVO.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
Capítulo 1	8
MODELOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUME DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PELA MORFOMETRIA DA COPA OBTIDA COM LIDAR	9
RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
INTRODUÇÃO	11
MATERIAL E MÉTODOS	12
Localização e caracterização da área de estudo	12
Formação da base de dados.....	12
Estimativa do volume do fuste.....	16
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
Volume do fuste obtido pelos índices morfométricos considerando o DAP	17
Volume do fuste obtido pelos índices morfométricos sem o DAP	20
CONCLUSÕES	22
Capítulo 2	23
EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CLAREIRAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL DE PRECISÃO NA AMAZÔNIA PELA MORFOMETRIA DAS COPAS OBTIDAS COM LIDAR	24
RESUMO.....	24
ABSTRACT	25
INTRODUÇÃO	26
MATERIAL E MÉTODOS	27
Localização e caracterização da área de estudo	27
Perfilamento florestal com o LIDAR aerotransportado	28
Inventário florestal e composição da amostra das árvores dominantes e codominantes.....	28
Pré-processamento e isolamento das árvores de interesse.....	29
Variável dependente oriunda da mensuração de clareiras	30
Variáveis independentes obtidas da morfometria da copa e do fuste	32
Desenvolvimento dos modelos para estimativa da área de clareira das árvores cortadas	33
Análise de influência	33
Crítérios para escolha da melhor equação ajustada	33
RESULTADOS	34
DISCUSSÃO	37
CONCLUSÃO.....	41
Capítulo 3	42
ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE FUSTE EM ÁREA DE MANEJO DE PRECISÃO NA AMAZÔNIA PELA MORFOMETRIA DAS COPAS OBTIDAS COM LIDAR	43

RESUMO.....	43
ABSTRACT	44
INTRODUÇÃO	45
MATERIAL E MÉTODOS.....	46
Local do estudo	46
Inventário florestal	47
Dados LIDAR	47
Quantificação do volume do fuste	48
Quantificação da biomassa	49
Processamento da nuvem de pontos do LIDAR para obtenção das variáveis morfológicas da copa.....	49
Variáveis explicativas	50
Equações alométricas para biomassa do fuste.....	51
Identidade de modelos por grupo de densidade	52
RESULTADOS	54
DISCUSSÃO	64
CONCLUSÃO.....	70
SÍNTESE	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXO	85

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes cubadas para o ajuste dos modelos volumétricos.	13
Tabela 2 - Equações ajustadas para estimar o volume do fuste de árvores dominantes e codominantes com uso do DAP e dos índices de morfometria da copa, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados, erro padrão (absoluto e percentual) e critério $Press_p$	18
Tabela 3 - Equações ajustadas para estimar o volume do fuste de árvores dominantes e codominantes a partir dos índices de morfometria da copa, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados, erro padrão (absoluto e percentual) e critério $Press_p$	20

Capítulo 2

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes para o ajuste dos modelos de clareiras.	29
Tabela 2 - Resultados da correlação entre as variáveis independentes e a área de clareira de árvores cortadas em condições de manejo florestal, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.....	34
Tabela 3 - Equações e estatísticas para estimativa da área de clareira das árvores cortadas em manejo florestal na Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	35

Capítulo 3

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes cubadas para o ajuste dos modelos alométricos.	48
Tabela 2 - Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares	53
Tabela 3 - Resultados descritivos das principais variáveis explicativas e volume do fuste de árvores dominantes e codominantes, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	55
Tabela 4 - Resultados da correlação entre as variáveis explicativas e a biomassa verde e seca das árvores cortadas em condições de manejo florestal, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	56
Tabela 5 - Resultados da correlação entre as variáveis explicativas da morfometria da copa e as variáveis explicativas tradicionalmente empregadas em modelos dendrométricos, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	57
Tabela 6 - Equações alométricas ajustadas para estimativa da biomassa seca e biomassa verde do fuste (toneladas) e estatísticas de precisão para árvores dominantes e codominantes, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	58
Tabela 7 - Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F para as equações de estimativa da biomassa seca, considerando três diferentes combinações de conjunto de espécies classificadas por densidade básica da madeira, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	62
Tabela 8 - Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F para as equações de estimativa da biomassa verde, considerando três diferentes combinações de conjunto de espécies classificadas por densidade básica da madeira, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.	63

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1 - Árvores isoladas da vegetação de sub-bosque com dados do LIDAR: a) <i>Dipteryx odorata</i> Wild (cumaru-ferro), b) <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn. (samaúma), c) <i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F. Macbr. (cumaru-cetim), Floresta Estadual do Antimary (FEA).....	15
Figura 2 - Variáveis morfométricas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).....	16
Figura 3 - (a) Distribuição dos resíduos percentuais e (b) comportamento dos volumes estimados em relação aos volumes reais da equação recomendada.....	19
Figura 4 - (a) Distribuição dos resíduos percentuais e (b) comportamento dos volumes estimados em relação aos volumes reais da equação recomendada (sem DAP).....	21

Capítulo 2

Figura 1 - a) Nuvem de pontos do LIDAR sem processamento de normalização e b) nuvem de pontos normalizada a partir da subtração dos valores de elevação do MDT.....	30
Figura 2 - Nuvens de pontos do LIDAR: a) árvore de interesse <i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>stilbocarpa</i> (Hayne) Lee et Lang (perfilamento pré-exploratório) e b) clareira gerada pelo corte da árvore (perfilamento pós-exploratório) e a demarcação da área de impacto.	31
Figura 3 - Variáveis morfométricas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).....	32
Figura 4 - Gráfico de distribuição dos resíduos percentuais para as equações 1 a 10, Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.....	36
Figura 5 - Nuvens de pontos do LIDAR de uma árvore com a copa quebrada da espécie <i>Dipteryx odorata</i> Wild (cumaru-ferro), Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.....	38

Capítulo 3

Figura 1 - Mapa de localização da Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.....	47
Figura 2 - Variáveis morfométricas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).....	51
Figura 3 - Distribuição dos resíduos percentuais das melhores equações para estimativa da biomassa seca, com DAP e sem DAP.	59
Figura 4 - Distribuição dos resíduos percentuais das melhores equações para estimativa da biomassa verde, com DAP e sem DAP.....	60

Lista de Abreviações e Siglas

3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Acre
ALTM	Aerial laser terrain mapper
APC	Área de projeção de copa (m^2)
Bsc	Biomassa seca
Bvd	Biomassa verde
Cc	Comprimento de copa (m)
Cg	Comprimento de galhada (m)
Cook's D	Distância de Cook - medidor de atipicidade de uma observação pelos mínimos quadrados para uma dada regressão
DA	Densidade aparente da madeira
DAP	Diâmetro à altura do peito a 1,3 m ou acima de qualquer sapopema (cm)
DB	Densidade básica da madeira
DBal	Densidade básica para espécies de alta densidade da madeira ($0,7 \text{ g.cm}^{-3}$)
DBbx	Densidade básica para espécies de baixa densidade da madeira ($< 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$)
DBH	Diameter at breast height
dBm	Decibel miliwatt
DBmd	Densidade básica para espécies de média densidade da madeira ($0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ DB $< 0,7 \text{ g.cm}^{-3}$)
DC	Diâmetro médio da copa (m)
DDFFITS	Medidor de atipicidade de uma observação para uma dada regressão
Dmax	Diâmetro médio da ponta grossa do fuste
Dmin	Diâmetro médio da ponta fina do fuste
DW	Teste de Durbin-Watson
Embraer	Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	Teste de Fischer
F 5%	Valor tabelado do teste de Fischer (5%)
FC	Formal de copa
FEA	Floresta Estadual do Antimary
G	Área basal
GE	Grau de esbeltez
GL	Grau de liberdade
GNSS	Sistema de navegação global por satélite
GPS	Sistema de posicionamento global
GPS L1	Sistema de posicionamento global com uma frequência pós-processadas
GPS L1/L2	Sistema de posicionamento global com duas frequências pós-processadas
H	Diagonal da matriz H
H0	Hipótese nula ou zero
H1	Hipótese alternativa
Hic	Altura de inserção da copa (m)
Hsolo	Cota altimétrica na localização da árvore de interesse
Ht	Altura total da árvore (m)
Hz	Hertz - unidade de frequência de um evento periódico ou ciclo
IA	Índice de abrangência
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEV	Índice de espaço vital
IMAC	Instituto de Meio Ambiente do Acre
INPA	Instituto de Pesquisas da Amazônia
IS	Índice de saliência
LIDAR	Light detection and ranging
LSA	Laser scanner aerotransportado
MC	Manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m^2)
MDT	Modelo digital do terreno
Modelflora	Modelo digital de exploração florestal
mrad	Miliradiano ou milésimo de radiano

NS	Estatisticamente não significativo
PC	Proporção de copa
Press_p	Estatística de validação e uma regressão, a qual avalia se a equação ajustada pode prever os valores observados
PZ	Parque Zoobotânico
QM	Quadrado médio
R²_{aj.}(%)	Coefficiente de determinação ajustado
RA	Realidade aumentada
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RIOB	Estação Rio Branco da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
S	Estatisticamente significativo
SIRGAS	Sistema de referência geocêntrico para as Américas
SQ_(diferença)	Soma do quadrado da diferença
SQ_(resíduo)	Soma do quadrado do resíduo
SQ_{Req}	Soma do quadrado da regressão
SQ_{Total}	Soma do quadrado total
SW-FM/COC	SmartWood - Forest Management/Chain-of-Custody
S_{yx}	Erro padrão
S_{yx}(%)	Erro padrão percentual
UFAC	Universidade Federal do Acre
UPA	Unidade de produção anual
UTM	Universal transversa de Mercator
VCop	Volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m ³)
VF	Volume do fuste

INTRODUÇÃO GERAL

O manejo florestal na Amazônia Brasileira tem-se consolidado como uma alternativa econômica de menor impacto ambiental e que proporciona a permanência da floresta permitindo sua funcionalidade ecológica.

O planejamento da exploração florestal em áreas de manejo na Amazônia inicia-se com o inventário censitário das árvores comerciais acima de 40 cm de diâmetro à altura do peito ($DAP_{1,3m}$) (Ibama 2006; Figueiredo *et al.* 2007).

Até 2007, a metodologia predominante de inventário florestal censitário era baseada na localização das árvores em campo a partir de picadas paralelas abertas em uma distância de 50 metros uma da outra. Tendo a picada como referência absoluta do planejamento florestal, as árvores são localizadas pela construção de uma falsa coordenada X,Y, em que o eixo Y corresponde à linha da picada e a distância percorrida pela equipe de inventário florestal consiste no valor de Y. O eixo X refere-se à linha perpendicular ao eixo Y, sendo que no eixo X a informação coletada da distância pode oscilar de 0 a 25 metros, considerando a orientação do lado direito e esquerdo da picada (Amaral *et al.* 1998; Freitas *et al.* 2005; Ibama 2006; Figueiredo *et al.* 2007).

Esse procedimento foi um grande avanço no planejamento florestal da Amazônia, porque disciplinou o planejamento e as técnicas de exploração. Porém, uma série de problemas eram conhecidos ou até mesmo ignorados pelos engenheiros e órgãos de controle ambiental. Dentre os muitos problemas, vale destacar dois aspectos:

- i) Primeiro, a localização da árvore é feita a partir da picada alocada fisicamente da unidade de produção anual (UPA), em que cada árvore recebe um endereço [Y, X(direita ou esquerda)]. Com a regeneração da vegetação da picada, as informações de localização se degradam tornando impraticável saber a posição da árvore na área da UPA. Com o prejuízo da qualidade da informação de localização das árvores, em decorrência da regeneração da vegetação nas picadas, os órgãos de licenciamento ambiental apresentam grande dificuldade de vistoria. Portanto, não conseguem conferir a precisão e a veracidade das informações prestadas no planejamento florestal. Em casos

extremos, o órgão ambiental estabelece uma pendência técnica do licenciamento que consiste na reabertura das picadas.

ii) O segundo aspecto está relacionado à grande influência que o relevo exerce na precisão do método das picadas e coordenadas X,Y. Em áreas planas o planejamento funciona bem e os problemas de localização são minimizados. Porém, em terrenos com relevo ondulado, a adequada localização das árvores depende da correção do efeito da declividade na informação de posição Y (Figueiredo e Cunha 2007). Por se tratar de uma tarefa mais complexa, as equipes de inventário negligenciam essa etapa e os mapas de exploração florestal tornam-se um mero instrumento protocolar junto aos órgãos de meio ambiente. Alguns técnicos ambientais e engenheiros classificavam as áreas de relevo ondulado como não operacionais, devido às dificuldades de planejamento. Em decorrência dos problemas de mapeamento pelo método X,Y em relevo ondulado, torna-se impraticável a realização de uma vistoria prévia de licenciamento e, principalmente, de uma vistoria pós-exploração, quando a grande maioria das informações de localização foram perdidas pela movimentação de máquinas e pelas clareiras das árvores cortadas.

Em 2006, a empresa californiana SiRF Technology Inc., sediada em San Diego, disponibilizou no mercado o chipsets Sirf Star e seu software para receptores GPS. Esse chipsets tinha a promessa de revolucionar o uso do GPS em decorrência da alta capacidade de decodificar sinais GPS em níveis extremamente baixos (- 160 dBm). A alta sensibilidade do Sirf Star possibilitaria ampliar o uso dos receptores GPS de maneira rápida e segura, principalmente para uso civil, em locais de construções altas e florestas com dossel fechado (Garmin 2007; Sirf 2014).

Com isso estava aberta uma nova possibilidade para o planejamento de florestas tropicais, ou seja, transportar e adaptar o conhecimento acumulado na agricultura de precisão para a realidade das florestas tropicais, pois a apropriação de uma coordenada geográfica que até então era plausível somente em áreas abertas sem obstrução do sinal, agora é possível no interior das florestas.

Assim, no final de 2006 e início de 2007, a Embrapa no Brasil divulga a tecnologia Modelo Digital de Exploração Florestal - Modeflora® (Figueiredo *et al.* 2007) e a empresa Helveta no Reino Unido (Helveta 2014) o sistema Digital

Passaport™, ambas tecnologias de planejamento de florestas tropicais baseadas na localização geográfica das árvores.

A Helveta é uma empresa privada que expandiu seu mercado junto às indústrias madeireiras sediadas na África e algumas poucas experiências na América do Sul. Enquanto a Embrapa, uma empresa pública brasileira, dedicou esforços em qualificar gratuitamente professores universitários dos cursos de engenharia florestal, engenheiros florestais no mercado nacional e técnicos ambientais vinculados aos órgãos públicos de controle, onde os procedimentos recomendados pelo Modelflora (Figueiredo *et al.* 2010) já são uma rotina no processo de licenciamento de manejo dos órgãos ambientais (Feitosa *et al.* 2012).

Nesse novo cenário de planejamento florestal em áreas tropicais, a realidade começou a ser transformada, porém ainda persistem antigos problemas e, também, surgem novas demandas tecnológicas para a melhoria do sistema de planejamento, agora chamado de manejo de precisão em florestas tropicais (Ribeiro 2002; Mattos e Braz 2007). Entre os problemas antigos e novos destacam-se:

i) Mapeamento censitário com a localização de todas as árvores de interesse dentro da unidade de produção. O inventário florestal censitário é uma atividade extenuante para a equipe de campo, a qual é submetida a longas caminhadas de modo a cobrir a localização de todas as árvores de interesse, e o rendimento de uma equipe de inventário não supera 26 hectares/dia (Figueiredo e Lima 2008). No entanto, nem sempre é possível localizar todos os indivíduos, principalmente, devido à tipologia florestal, características do sub-bosque, condições do relevo e nível de fadiga dos operários florestais.

Não é rara a localização de árvores de interesse de grandes dimensões pela equipe de exploração, as quais não foram mapeadas pela equipe de inventário. Isso acarreta em readequar em campo o planejamento local, de maneira a reposicionar um pátio de estocagem, realocar a abertura de uma estrada, ou decidir se corta ou mantém em pé uma árvore prevista para exploração.

ii) Mensuração florestal - a altura total ou comercial de uma árvore, na grande maioria dos casos, não é medida, devido à existência de um sub-bosque muito denso, o qual não permite que os operários florestais visualizem o dossel superior da floresta.

Com intuito de amenizar o problema, muitos engenheiros têm optado pela adoção de equações de volume de simples entrada (DAP), acreditando na existência de uma possível relação hipsométrica (DAP/Ht), mas isso nem sempre reflete a realidade da Amazônia (Nogueira *et al.* 2008).

Até mesmo o DAP, em algumas oportunidades, não é mensurado em decorrência da presença de cipós de grande diâmetro junto ao fuste da árvore, os quais são cortados somente com o uso de motosserras. Outra situação que também dificulta a mensuração do DAP é a presença de espécies florestais com raízes tabulares altas (associadas ou não com cipós), sendo necessária a construção de andaimes com altura de até 4 metros.

Os vícios de coleta de dados pelas equipes de inventário florestal acarretam em estimativas de volume equivocadas, assim, mesmo que se tenha uma equação de volume ajustada para a área de produção, essa não consegue representar adequadamente o estoque de volume previsto para exploração florestal. A mesma falha de estimativa também é frequente quando a empresa florestal demanda o estoque de biomassa possível de ser manejada, pois as falhas de coleta de dados do inventário também refletem nessa informação de produção.

iii) As estimativas de impacto ainda são negligenciadas durante o planejamento da exploração, principalmente, quando se trata de redução do tamanho de clareiras. Ao se propor a exploração de uma área florestal são realizadas estimativas de abertura de estradas, pátios, pontes e bueiras (Ibama 2006), no entanto, uma das principais fontes de abertura do dossel florestal é a ocorrência de clareiras. O tamanho da clareira influencia a composição florística futura, de modo que diferentes espécies colonizam clareiras de distintos tamanhos (Swaine e Whitmore 1988; Whitmore 1996; Lima 2005). Portanto, conhecer previamente a possível área de clareira de uma determinada árvore por meio de equações de regressão é uma demanda dos planejamentos florestais que utilizam técnica de precisão, visto que ainda na fase de planejamento, pode ser trabalhada na seleção de árvores de interesse uma estratégia de maior rendimento volumétrico e menor impacto para floresta remanescente.

A adoção de uma tecnologia bastante conhecida de uso militar e da engenharia civil promete estabelecer um novo patamar na qualidade do planejamento florestal em regiões tropicais, trata-se do perfilamento a laser.

O perfilamento a laser, também conhecido como perfilamento com LIDAR (da sigla inglesa *Light Detection And Ranging*), tem-se destacado no meio florestal tropical e surge como uma novidade tecnológica. No entanto, o LIDAR é uma tecnologia que já era bastante conhecida na década de 1970, a exemplo do laser altimétrico presente como instrumento de bordo nas missões à Lua da Apollo 15,16 e 17 (Kaula *et al.* 1974).

Nas décadas seguintes, o emprego do LIDAR em aplicações florestais avançou de forma importante, pois, além de fornecer uma caracterização topográfica precisa do terreno (no caso da Amazônia caracterização do relevo e mapeamento dos canais de drenagem), os dados do LIDAR geram informações sobre a superfície do dossel e parâmetros como altura das árvores e dimensões das copas, elementos importantes para o manejo, tanto de florestas nativas como de plantadas (Popescu *et al.* 2002; Tiede *et al.* 2005).

Os sistemas de Laser Scanner Aerotransportado (LSA) permitem a cobertura de larga escala de superfície com a medição vertical e horizontal com elevada precisão (Zonete 2009). Já o laser de solo ou terrestre, apesar de menos utilizado, se apresenta como uma ferramenta promissora, na medida em que permite o escaneamento vertical das árvores, simulando uma cubagem rigorosa refinada e de alta precisão (Lingnau *et al.* 2008). Muitos outros trabalhos vêm demonstrar a importância do LIDAR como instrumento de mensuração e planejamento florestal, a exemplo de Andersen *et al.* (2003), Popescu *et al.* (2003), Coops (2007), Sasaki *et al.* (2008) e d'Oliveira *et al.* (2012).

Seguindo uma tendência de modernização das técnicas de planejamento florestal, a Embrapa propõe elevar o Modeflora a um novo patamar tecnológico chamado de Modeflora II. Nessa etapa, o perfilamento com LIDAR aerotransportado colocará o manejo de precisão em florestas tropicais em um *status* de elevada precisão, larga escala e economicidade.

Na nova fase do manejo de precisão em florestas tropicais, ocorrerão mudanças em diversas etapas do planejamento florestal de precisão e as metodologias usadas e/ou adaptadas, bem como os resultados alcançados nesta

tese, fornecerão parte da base científica necessária para esse avanço no manejo florestal de precisão na Amazônia.

OBJETIVO

Desenvolver modelos biométricos para o planejamento da exploração de manejos florestais, que empregam técnicas de precisão, com base no escaneamento 3D de larga escala.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar e processar o inventário censitário de 315 hectares de uma unidade de produção anual utilizando técnicas de precisão;
- Processar em três dimensões (3D) 1.000 hectares de floresta tropical modelados por scanners aerotransportados LIDAR, sendo 315 hectares planejados pelo Modelflora (não explorados), 315 hectares planejados convencionalmente (não explorados) e 370 hectares planejados convencionalmente (explorados);
- Realizar a cubagem rigorosa pelo método Smalian de 147 árvores codominantes e dominantes escaneadas em 3D pelo LIDAR;
- Mensurar os parâmetros morfométricos de copa de 340 árvores codominantes e dominantes escaneadas em 3D pelo LIDAR;
- Desenvolver equações para a predição do volume e a área de impacto de clareiras a partir da morfometria da copa e índices de localização geográfica;
- Desenvolver equações alométricas para a predição de biomassa do fuste das espécies inventariadas; e,
- Realizar teste de identidade de modelos para equações alométricas, visando avaliar a possibilidade de formação de grupos de espécies florestais por densidade básica da madeira.

Capítulo 1

Figueiredo, E.O.; d'Oliveira, M.V.N.; Fearnside, P.M.; Papa, D.A.
2014. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela
morfometria da copa obtida com LIDAR. Submetido à *Revista Cerne*.
Aceito para publicação em 29 de abril de 2014.

MODELOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUME DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PELA MORFOMETRIA DA COPA OBTIDA COM LIDAR

RESUMO

A estimativa volumétrica a partir do escaneamento digital de florestas, por meio do uso do LIDAR, potencializa o emprego de técnicas de manejo de precisão no planejamento da exploração nas florestas tropicais. A utilização dessa tecnologia de sensoriamento remoto permite a incorporação de variáveis da morfometria da copa, ainda pouco empregadas e menos conhecidas em decorrência da dificuldade de coleta em campo. O objeto deste estudo foi construir equações capazes de estimar o volume do fuste de árvores individuais dominantes e codominantes a partir da morfometria da copa obtida por meio do LIDAR aerotransportado, considerando duas situações de inventário florestal: a) com a coleta do DAP, conjuntamente com as variáveis morfométricas da copa obtidas pelo LIDAR e b) apenas com os dados de morfometria da copa. Para seleção dos modelos foram consideradas a matriz de correlação das variáveis preditoras e a combinação das variáveis que geraram os melhores resultados estatísticos pelos critérios S_{yx} , $S_{yx}(\%)$ e $Press_p$, e que foram homocedásticos e com disposição dos resíduos normais e independentes. Para as melhores equações foi realizada análise de influência. Os resultados estatísticos do ajuste dos modelos para as duas situações permitiram selecionar equações com e sem DAP, com resultados $R^2_{aj.}(\%)$ de a) 92,92 e b) 79,44; $S_{yx}(\%)$ de a) 16,73 e b) 27,47; e critério $Press_p$ de a) 201,15 m⁶ e b) 537,47 m⁶, respectivamente. Por meio das variáveis morfométricas foi possível desenvolver equações capazes de estimar com precisão o volume do fuste de árvores dominantes e codominantes em florestas tropicais.

Palavras-chave: perfilamento a laser, análise de regressão, manejo florestal de precisão, Amazônia.

MODELS FOR ESTIMATING THE VOLUME OF INDIVIDUAL TREES BY MORPHOMETRY OF CROWNS OBTAINED WITH LIDAR

ABSTRACT

Volumetric estimates from digital scanning of the forests through the use of LIDAR, improve the use of precision forest management techniques in planning tropical forest logging operations. Use of this remote detection technology allows incorporation of crown morphometric variables that are still little known and little used due to the difficulty of collecting field data for volume equations. The objective of this study was to build equations capable of estimating the bole volume of dominant and codominant individual trees from crown morphometry obtained from airborne LIDAR. Two forest inventory situations are considered: a) with the collection of diameter at breast height (DBH), and crown morphometric variables obtained from LIDAR data and b) using only the crown morphometry variables. For the selection of models the factors considered were: the correlation matrix of predictor variables and the combination of variables that generates the best results as indicated by statistical criteria S_{yx} , S_{yx} (%) and $Press_p$, and that were homoscedastic and have normal and independent error distributions. Influence analysis was performed on the best equations. The results for the statistical fit of the equations to the two situations allowed selection of models with and without DBH, with R^2_{aj} (%) values of a) 92.92 and b) 79.44, S_{yx} (%) values of a) 16.73 and b) 27.47, and, $Press_p$ criterion values of a) 201.15 m⁶ and b) 537.47 m⁶, respectively. Through morphometric variables it was possible to develop equations capable of accurately estimating the bole volume of dominant and codominant trees in tropical forests.

Keywords: laser profiling, regression analysis, precision forestry, Amazon

INTRODUÇÃO

Os planos de manejo florestal na Amazônia Brasileira são licenciados com base em critérios que buscam, principalmente, garantir a qualidade dos dados dendrométricos referente ao volume do fuste, número de indivíduos e resíduos florestais para produção de energia. Apesar dos avanços na qualidade das informações florestais com emprego de técnicas de precisão por meio do uso do receptor GPS e geoprocessamento incorporados ao planejamento da exploração florestal (Figueiredo *et al.* 2007), os custos e a morosidade do inventário censitário para florestas tropicais continuam sendo um problema de base tecnológica a ser resolvido.

No meio florestal, a expectativa da adoção do perfilamento por meio do LIDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportado é que os inventários proporcionarão uma combinação desejada de baixo custo, precisão, qualidade e confiabilidade.

A estimativa volumétrica a partir do escaneamento digital de florestas potencializará o uso de técnicas de precisão no planejamento da exploração florestal, tornando essas estimativas um importante instrumento de consolidação do manejo. Com isso espera-se que o planejamento reflita melhor a realidade de campo, a exemplo dos resultados de estimativas de volume, biomassa, área basal e contagem de árvores obtidos por Ioki *et al.* (2010) e Gonçalves-Seco *et al.* (2011).

Quando se trata de estimativas biométricas por árvore individual com o LIDAR aerotransportado, necessariamente serão agregadas aos modelos volumétricos as variáveis da morfometria da copa ainda pouco empregadas e menos conhecidas (Popescu *et al.* 2003). Os resultados de pesquisa com a morfometria da copa de árvores individuais pelo perfilamento com LIDAR aerotransportado ainda são escassos e limita-se a florestas plantadas ou naturais no hemisfério norte, conforme Holmgren *et al.* (2003), Andersen *et al.* (2011) e Bottai *et al.* (2013). Devido às dificuldades de coleta em campo, as variáveis morfométricas eram preteridas e agora ganham destaque pela forma rápida e segura com que os dados são obtidos por meio do perfilamento da floresta.

A morfometria da copa é o estudo da matemática das formas em uma mesma população de árvores. As formas e dimensões das árvores e sua modificação com o

tempo adquirem nova importância, dada a possibilidade de ajustamento de modelos estatísticos de estimativa volumétrica, concorrência e de crescimento (Hasenauer *et al.* 1995).

O objetivo deste estudo foi desenvolver equações para floresta tropical na Amazônia capazes de estimar o volume do fuste de árvores individuais dominantes e codominantes a partir da morfometria da copa obtida por meio do perfilamento florestal com LIDAR aerotransportado, considerando duas situações de levantamento: a) com a coleta em campo do diâmetro à altura do peito (DAP), conjuntamente com variáveis morfométricas da copa e b) apenas com os dados de morfometria da copa.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

Os estudos foram desenvolvidos em área de plano de manejo florestal da Floresta Estadual do Antimary (FEA), localizada nos municípios de Bujari e Sena Madureira (AC), numa área de 315 hectares.

O clima é classificado como Aw (Köppen) com precipitação anual média de 2.000 mm, temperatura média de 25 °C e uma estação seca entre os meses de junho e setembro. A vegetação é composta por três fisionomias florestais principais: florestas densas, florestas abertas e florestas abertas com bambus (tabocas). A área possui uma topografia suave ondulada com elevação máxima em torno dos 300 metros. Os solos predominantes são latossolos amarelos distróficos (Acre 2000).

Formação da base de dados

A base de dados foi organizada em quatro categorias, sendo: 1) base de dados do inventário censitário pelas técnicas preconizadas pelo Modelo Digital de Exploração Florestal (Figueiredo *et al.* 2007): foi realizada a identificação e localização geográfica das árvores de interesse comercial e obtenção dos pontos barométricos calibrados por meio de GPS de alta sensibilidade. Foram coletadas exsicatas das espécies que compõem a amostra e depositadas no Herbário da Universidade Federal do Acre (UFAC/PZ); 2) arquivos de nuvens de pontos de

reflexão do LIDAR de 315 hectares de floresta; 3) dimensão e arquitetura das copas das árvores da amostra, obtidas pelo processamento dos dados do LIDAR e verificações de campo; e 4) dados de cubagem rigorosa pelo método de Smalian.

A Tabela 1 apresenta a estrutura da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica das árvores de interesse que foram cortadas e cubadas, visando compor a base de dados para o ajuste dos modelos volumétricos. Ressalta-se aqui que a amostra seguiu o mesmo padrão de distribuição diamétrica da floresta inventariada, de maneira a atender os critérios legais de exploração e condicionantes ambientais da Licença de Operação do Instituto de Meio Ambiente do Acre - IMAC, Nº 530/2008 e Certificação SmartWood nº SW-FM/COC-1670.

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes cubadas para o ajuste dos modelos volumétricos.

Table 1 - *Proportional-sampling data base stratified by diameter class of the dominant and codominant trees with volumes measured for use in fitting the volumetric models.*

Classes diamétricas	Intervalo das classes (cm)	Nº indivíduos da população inventariada	%	Nº indivíduos para o ajuste dos modelos de volume	%
I	45 f 75	1.294	61,88	88	60,27
II	75 f 105	570	27,26	41	28,08
III	105 f 135	174	8,32	12	8,22
IV	135 f 165	53	2,53	5	3,42
Total		2.091	100,00	146	100,00

Levantamento florestal com o LIDAR aerotransportado e pré-processamento

O perfilamento pelo LIDAR ocorreu entre 29 de maio e 3 de junho de 2010, utilizando-se o sistema Optech ALTM 3100 EA acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II, modelo Neiva/Embraer 810C. O voo foi realizado à velocidade média de 210 km.h⁻¹, em uma altura de 300 m, diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15°, frequência de varredura de 58,7 Hz e intensidade média de 43,03 pontos.m⁻² (d'Oliveira *et al.* 2012).

Os dados de reflexão do LIDAR referentes à área florestal foram estruturados inicialmente em 315 arquivos de nuvens de pontos. Posteriormente, foram montados mosaicos com área média de 25 hectares e cerca de 11 milhões de pulsos. Os

arquivos foram processados em base tridimensional em software específico (Quick Terrain Modeler).

A etapa seguinte foi a localização das 2.091 árvores dominantes e codominantes de interesse, inventariadas em campo com a apropriação de uma coordenada geográfica com GPS de alta sensibilidade. As coordenadas apropriadas em campo pelo inventário receberam a transformação geocêntrica nos parâmetros X,Y,Z visando à localização exata das árvores de interesse no arquivo de pontos do LIDAR.

Os dados de nuvens de pontos receberam tratamento conjunto com a aplicação de filtros de cores considerando a altura e a textura da superfície alvo, além da combinação de um valor do modelo digital de elevação e a textura da superfície do alvo. Posteriormente, foi aplicado um controle de reflexão denominado de Voxel Autosize, em que pontos projetados na superfície são processados em tamanhos diferentes, com base em sua posição em relação ao plano de visualização, ou seja, pontos que estão próximos ao plano de visualização ficam maiores, enquanto os pontos que estão longe do plano de visualização ficam menores (Applied Imagery 2010). Esse processo facilita o desenho do contorno de árvores dominantes e codominantes e, conseqüentemente, o processo de isolamento das árvores.

O isolamento dos pontos do LIDAR das árvores da amostra foi feito por meio da confecção de um polígono tridimensional na região do entorno da copa. Esta região foi recortada da nuvem de pontos total. Essa operação serviu para garantir que todos os pontos fossem selecionados em uma determinada região XYZ, incluindo a árvore de interesse e a vegetação sob a sua copa.

A árvore foi isolada da vegetação do sub-bosque seguindo o mesmo procedimento de confecção de polígonos e recortes sucessivos, porém agora em duas dimensões (Figura 1). Independentemente da espécie florestal, as variáveis explicativas das árvores individuais constituíram o conjunto de dados para o desenvolvimento de modelos volumétricos globais.

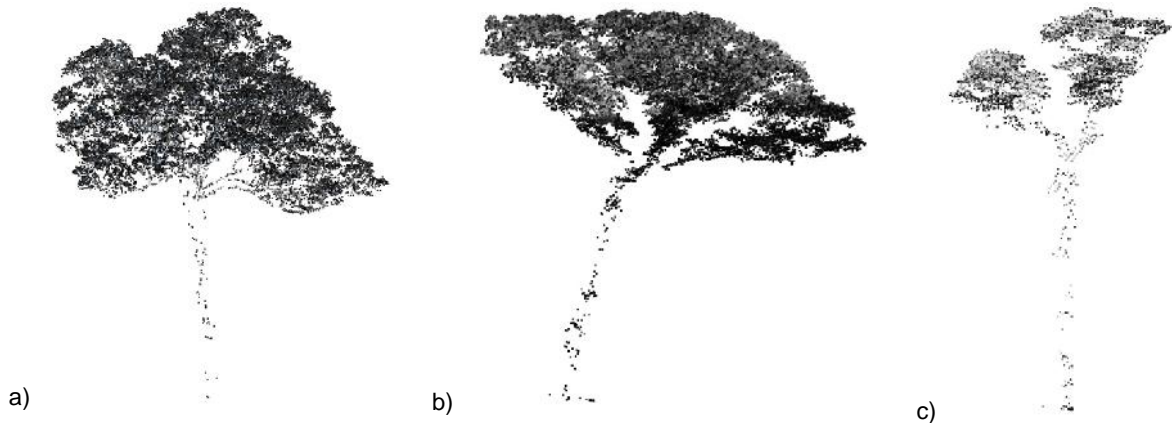


Figura 1 - Árvores isoladas da vegetação de sub-bosque com dados do LIDAR: a) *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro), b) *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (samaúma), c) *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr. (cumaru-cetim), Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

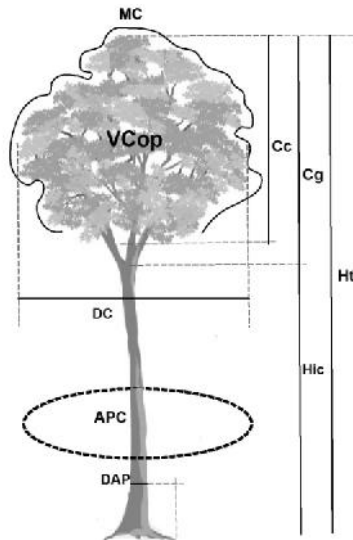
Figure 1 - Trees isolated from the understory vegetation using LIDAR data: a) *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro), b) *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (samaúma), c) *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr. (cumaru-cetim), Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Variáveis independentes obtidas da morfometria da copa

Para constituir a base de dados das variáveis independentes dos modelos volumétricos foram consideradas duas situações de levantamento florestal. A primeira considerou a coleta do $DAP_{1,3m}$ (ou acima de qualquer sapopema) em campo e todas as variáveis dos índices morfométricos da copa obtidas pelo perfilamento a laser, e a segunda apenas os dados morfométricos da copa obtidos pelo LIDAR, sem considerar o emprego do DAP.

Assim, foi feita uma adaptação das variáveis morfométricas da árvore (Figura 2), propostas por Burger (1939), para construção dos modelos com a finalidade de estimar o volume, sendo: comprimento de copa (Cc), comprimento da galhada (Cg), diâmetro médio da copa (DC), altura total da árvore (Ht), altura de inserção da copa (Hic), proporção de copa ($PC = Cc/Ht$), grau de esbeltez ($GE = Ht/DAP$), índice de saliência ($IS = DC/DAP$), índice de abrangência ($IA = DC/Ht$), formal de copa ($FC = DC/Cc$), índice de espaço vital ($IEV = (DC/DAP)^2$), volume de copa pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (VCop), área de projeção de copa (APC) e manto de copa (MC), além da cota de elevação do terreno no ponto de localização da árvore (Hsolo). As variáveis Cc, Cg, DC, Ht e as procedentes destas foram obtidas

pelos processamentos dos dados do LIDAR e verificadas em campo. As variáveis VCop, APC e MC foram obtidas na forma digital pelo LIDAR, sem a averiguação de campo, em decorrência da dificuldade de mensurar essas informações na floresta.



Em que:

Cc = Comprimento de copa (m)

Cg = Comprimento de galhada (m)

DC = Diâmetro médio da copa (m)

Ht = Altura total da árvore (m)

DAP = Diâmetro à altura do peito a 1,3 m/coletado em campo (cm)

Hic = Altura de inserção da copa (m)

APC = Área de projeção de copa (m²)

VCop = Volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m³)

MC = Manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m²)

Figura 2 - Variáveis morfométricas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).

Figure 2 - Tree morphometric variables using LIDAR data and DBH. Adapted from Burger (1939).

Estimativa do volume do fuste

Os volumes da cubagem rigorosa das 146 árvores dominantes e codominantes constituem os dados da variável dependente dos modelos de regressão e os índices morfométricos da copa (com e sem DAP) compõem as variáveis independentes.

Os dados tabelados foram submetidos a uma análise de correlação para determinar intensidade da relação linear entre a variável dependente e as predictoras, e assim apontar inicialmente as variáveis mais significativas para construção dos modelos.

As variáveis independentes com coeficiente de correlação inferior a -0,65 e superior a 0,65 foram submetidas a uma rotina de seleção de todos os modelos possíveis (Ryan 2011) que ponderou a inclusão de 2 a 6 parâmetros (β_i), sem multicolineariedade, com distribuição normal dos resíduos, independentes e homocedásticos, para isso, foram realizadas as seguintes estatísticas: matriz de multicolineariedade, distribuição do erro padronizado, teste de Durbin-Watson (DW) e o F-máximo de Hartley (Sas 1990; Statgraphics 2006).

Para cada um dos modelos indicados pela rotina de seleção (Ryan 2011) foi obtida uma equação de volume e examinada a significância estatística de cada variável adicionada por meio do teste de Fischer (teste F). As variáveis com nível de significância $< 0,15$ foram retiradas do polinômio visando a sua simplificação. O estabelecimento de um parâmetro para o teste Fischer de 0,15 ou 0,20 se faz necessário para evitar que durante o processo de desenvolvimento se remova e inclua a mesma variável explicativa em sucessivos passos (Statgraphics 2006).

Para cada equação de volume ajustada, foi realizada uma análise de influência das observações. Foram consideradas observações influentes aquelas que provocam diferenças substanciais nos valores calculados da estatística na presença e ausência da observação. Na avaliação dos impactos das possíveis observações influentes para modelos lineares, foram adotados os seguintes medidores de atipicidade: elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS e distância de Cook's.

A seleção do melhor modelo foi baseada na análise gráfica dos resíduos em porcentagem, no erro padrão absoluto e percentual (S_{yx} e $S_{yx}\%$), no critério $Press_p$ e no coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj}\%$).

O critério $Press_p$ é uma medida que avalia se a equação ajustada pode prever os valores observados Y_i . Assim, cada valor ajustado (\hat{y}_i) é alcançado eliminando-se o i -ésimo caso do conjunto de dados e ajusta-se uma nova função de regressão para o modelo em questão com as $(n-1)$ observações restantes. Em cada nova equação para obter o valor predito ($\hat{y}_{i(i)}$) da i -ésima observação, estima-se o erro de predição $Press_p$ do i -ésimo caso ($Y_i - \hat{y}_{i(i)}$). Assim, o critério $Press_p$ consiste na soma de todos esses erros de predição quadráticos e funciona como um instrumento de validação da equação, em que os melhores ajustes geram os menores valores de $Press_p$ (Sas 1990; Statgraphics 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Volume do fuste obtido pelos índices morfométricos considerando o DAP

Os resultados da matriz de correlação apontaram que as variáveis DAP, área de projeção de copa (APC), diâmetro médio da copa (DC), índice de abrangência (IA), manto da copa (MC) e volume da copa (VCop) apresentaram correlação

positiva superior a 0,65 e o grau de esbeltez (GE) e a elevação do terreno (Hsolo) com correlação negativa inferior a -0,65. Portanto, para a construção dos modelos de volume, as demais variáveis morfométricas foram descartadas em decorrência de sua correlação não significativa.

Os melhores resultados de correlação foram observados para o DAP e o manto da copa (MC), este último com correlação positiva com o volume do fuste superior a 0,80. Apesar dos valores de manto da copa (MC) serem obtidos somente pelo processamento digital da nuvem de pontos do LIDAR, essa variável se mostrou bastante promissora como preditora do volume, juntamente com a área de projeção da copa (APC) e o volume da copa (VCop).

A rotina de combinação das variáveis independentes possibilitou selecionar dez conjuntos de variáveis para construção das equações de volume (Tabela 2).

Tabela 2 - Equações ajustadas para estimar o volume do fuste de árvores dominantes e codominantes com uso do DAP e dos índices de morfometria da copa, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados, erro padrão (absoluto e percentual) e critério $Press_p$.

Table 2 - Fitted equations to estimate bole volume of dominant and codominant trees from DBH and crown morphometry variables, with their respective adjusted coefficients of determination, standard errors (absolute and percentage) and $Press_p$ criterion values.

Nº	Equação	$R^2_{aj.}(\%)$	$S_{yx}(m^3)$	$S_{yx}(\%)$	$Press_p(m^6)$
1*	$VF = -16,0666 + 0,244099.DAP + 0,109968.GE - 0,00826033.APC + 0,0000153755.APC^2 + i$	92,92	$\pm 1,218$	16,73	201,16
2	$VF = 1,6275 + 0,0011387.DAP^2 + 0,00000327065.APC^2 - 4,57314.IA + 0,000476786.VCOP + i$	88,28	$\pm 1,380$	19,64	272,34
3	$VF = -15,5119 + 0,231758.DAP + 0,0895972.GE + 0,00000677426.APC^2 - 0,0000540946.VCOP + i$	90,12	$\pm 1,400$	19,69	277,13
4	$VF = -4,55759 + 0,00135084.DAP^2 + 0,0587816.GE + 0,00000232229.APC^2 + 0,000226159.VCOP + i$	88,23	$\pm 1,379$	19,73	267,41
5	$VF = 1,57443 + 0,00116249.DAP^2 + 0,0000077315.APC^2 - 3,95997.IA + i$	88,13	$\pm 1,423$	20,01	289,29
6	$VF = -5,15278 + 0,00139448.DAP^2 + 0,0681841.GE + 0,00000446226.APC^2 + i$	87,84	$\pm 1,440$	20,25	294,36
7	$VF = -0,12709 + 0,0011201.DAP^2 + 0,00000680945.APC^2 + i$	87,59	$\pm 1,440$	20,52	286,78
8	$VF = -0,0559181 + 0,00111787.DAP^2 + 0,00000452231.MC^2 + i$	87,42	$\pm 1,451$	20,67	291,82
9	$VF = -6,67487 + 0,173926.DAP + 0,0000083663.APC^2 + i$	87,48	$\pm 1,450$	20,71	280,52
10	$VF = -0,737966 + 0,00116706.DAP^2 + 0,00369934.APC + i$	86,28	$\pm 1,473$	21,26	298,60

Em que: APC = área de projeção da copa (m^2); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); GE = grau de esbeltez; IA = índice de abrangência; MC = manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m^2); VCOP = volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m^3); VF = volume do fuste (m^3); $R^2_{aj.}(\%)$ = coeficiente de determinação ajustado em percentagem; $S_{yx}(m^3)$ = erro padrão absoluto; $S_{yx}(\%)$ = erro padrão percentual; $Press_p$ = soma dos quadrados do erro da predição (m^6); i = estimativa do erro; e, * equação recomendada para uso.

A obtenção de estimativas de volume por árvores individuais é o princípio para um planejamento operacional no manejo florestal, e o uso de variáveis morfométricas da copa tendem a melhorar a precisão dessas estimativas conforme resultados observados na equação de número 1. Nenhum dos modelos que usa exclusivamente as variáveis independentes tradicionalmente empregadas (DAP, Ht) obteve resultados melhores do que os modelos que também aplicam variáveis oriundas dos índices de morfometria da copa. Resultados inferiores com equações de simples (DAP) e de dupla entrada (DAP, Ht) na Amazônia também foram obtidos por Silva (2007) e Barros e Silva Júnior (2009).

A equação (número 1) $VF = -16,0666 + 0,244099 \cdot DAP + 0,109968 \cdot GE - 0,00826033 \cdot APC + 0,0000153755 \cdot APC^2$, obtida pelo processo de seleção (Statgraphics 2006), alcançou os melhores resultados estatísticos (Tabela 2), cujo gráfico de resíduo percentual não apresenta uma tendência marcante de super ou subestimativa ao longo da amplitude dos volumes (Figura 3a), sendo recomendada para uso. Na Figura 3b, quando se observam os volumes reais e estimados, verifica-se que os valores estimados apresentam uma boa distribuição e proximidade com os valores reais, mostrando a adequabilidade da equação.

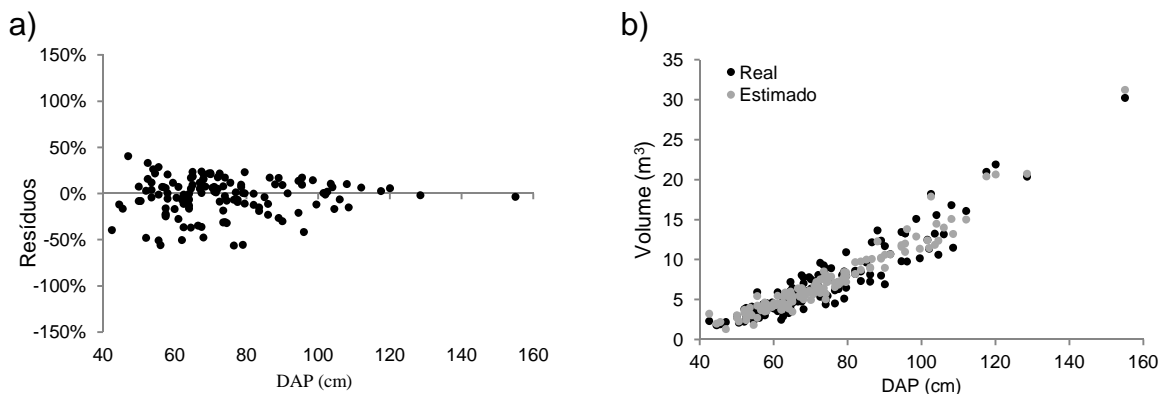


Figura 3 - (a) Distribuição dos resíduos percentuais e (b) comportamento dos volumes estimados em relação aos volumes reais da equação recomendada.

Figure 3 - (a) Distribution of percentage residuals and (b) estimated vs. observed volumes for the recommended equation.

Volume do fuste obtido pelos índices morfométricos sem o DAP

Os resultados da matriz de correlação são os mesmos descritos anteriormente, porém, em decorrência da retirada do DAP das variáveis independentes, não foi considerada a inclusão do grau de esbeltez (GE).

Na Tabela 3 são apresentadas as estatísticas para as nove equações selecionadas pela combinação das variáveis com maior correlação com o volume do fuste, desconsiderando o DAP. Essas equações apresentam resultados para $R^2_{aj.}(\%)$ variando de 72,68 a 79,44 e erro padrão percentual $S_{yx}(\%)$ entre 27,47 e 30,84. As equações com o uso exclusivamente de variáveis de copa apresentaram resultados estatísticos inferiores aos obtidos pelas equações selecionadas com o DAP. Entretanto, quando se considera a equação recomendada de número 3, os resultados são similares ou até mesmo melhores que os alcançados pelas equações de simples entrada para Amazônia, elaboradas por Rolim *et al.* (2006), Silva (2007) e Barros e Silva Júnior (2009).

Tabela 3 - Equações ajustadas para estimar o volume do fuste de árvores dominantes e codominantes a partir dos índices de morfometria da copa, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados, erro padrão (absoluto e percentual) e critério $Press_p$.

Table 3 - Fitted equations for estimating bole volume of dominant and co-dominant trees from the crown morphometry index with their respective adjusted coefficients of determination, standard errors (absolute and percentage) and $Press_p$ criterion values.

Nº	Equação	$R^2_{aj.}(\%)$	$S_{yx}(m^3)$	$S_{yx}(\%)$	$Press_p(m^6)$
1	$VF = 2,05704 + 0,014205.DC^2 + 0,0397898.Hsolo - 19,0759.IA + 0,00000884883.MC^2 + i$	77,89	2,158	28,44	587,98
2	$VF = 9,159 + 0,0000133954.APC^2 + 0,0145481.DC^2 - 18,9683.IA + i$	74,50	2,075	28,33	533,07
3**	$VF = 9,88824 + 0,0148461.DC^2 - 20,3348.IA + 0,00000879273.MC^2 + i$	79,44	2,085	27,47	537,47
4	$VF = 9,68207 + 0,0158245.DC^2 - 19,0128.IA + 0,0000110549.MC^2 - 0,000685208.VCop + i$	78,09	2,160	28,57	597,33
5	$VF = 27,4414 - 1,48095.DC + 0,0485991.DC^2 - 17,5831.IA - 639,827.MC^{-1} + i$	78,02	2,201	28,60	607,82
6	$VF = 4,98352 + 0,502895.DC - 19,0156.IA + 0,0000118297.MC^2 + i$	74,09	2,144	28,91	577,30
7	$VF = 0,989362 + 0,0000132477.APC^2 + 0,0139819.DC^2 + 0,0432504.Hsolo - 18,2355.IA + i$	72,68	2,149	29,07	573,39
8	$VF = -4,50708 + 0,487974.DC + 0,0521928.Hsolo - 18,8065.IA + 0,0000116881.MC^2 + i$	73,11	2,186	29,09	595,06
9	$VF = 12,3288 + 366,902.APC^{-1} + 0,0142687.DC^2 - 23,0855.IA + 8,8763E-6.MC^2 - 629,726.MC^{-1} + i$	76,09	2,361	30,84	724,80

Em que: Hsolo = cota de elevação do terreno no ponto de localização da árvore (m) e ** equação recomendada para uso. APC, DC, i, IA, MC, $Press_p$, $R^2_{aj.}(\%)$, $S_{yx}(\%)$, $S_{yx}(m^3)$, VCop e VF foram definidos anteriormente.

Roberts *et al.* (2005) e Ioki *et al.* (2010) obtiveram resultados similares para equações de estimativas biométricas (DAP, Ht, diâmetro de copa e volume), porém, em situações de floresta plantada e de clima temperado. Estudos semelhantes para floresta tropical são escassos e apresentam um grande campo do conhecimento ainda a ser trabalhado.

Na Figura 4(a) observa-se que no gráfico de resíduo percentual para equação recomendada (3) há uma superestimativa para o volume das árvores com DAP entre 40 e 70 cm e uma pequena subestimativa entre os diâmetros de 100 a 110 cm. Isso aponta que os dados volumétricos podem ser tratados diferentemente por classe diamétrica visando melhorar a precisão dos modelos. Porém, há necessidade de ampliar a base de dados nas diferentes classes diamétricas, principalmente para as árvores de maior diâmetro. Na Figura 4(b), no gráfico do volume real e estimado nota-se uma dispersão maior dos volumes estimados, principalmente entre os diâmetros de 90 a 110 cm.

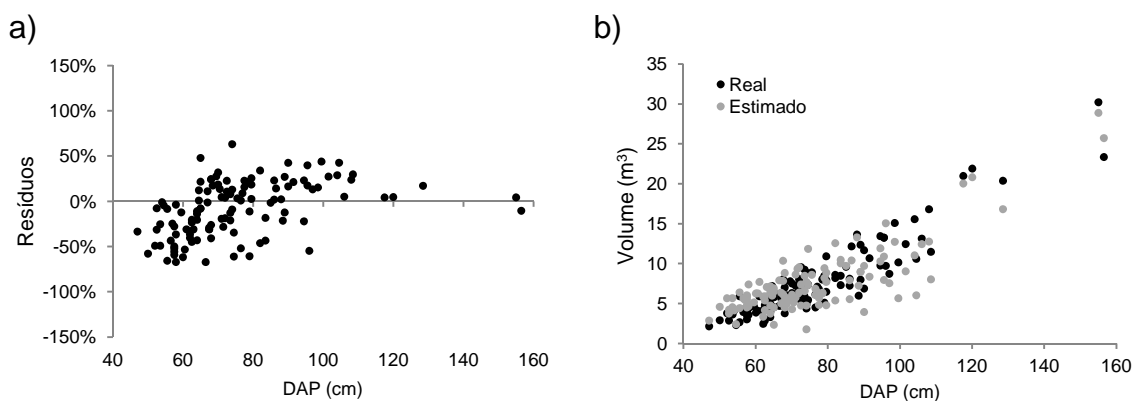


Figura 4 - (a) Distribuição dos resíduos percentuais e (b) comportamento dos volumes estimados em relação aos volumes reais da equação recomendada (sem DAP).

Figure 4 - (a) Distribution of percentage residuals and (b) estimated vs. observed volumes for the recommended equation (without DBH).

CONCLUSÕES

Os índices de morfometria obtidos com os dados do LIDAR: área de projeção da copa (APC), grau de esbeltez (GE), índice de abrangência (IA), manto da copa (MC), volume da copa (VCop) e diâmetro médio da copa (DC), conjuntamente com a elevação do terreno (Hsolo) e o DAP, foram as variáveis independentes mais adequadas para estimar o volume do fuste, gerando equações de boa precisão em toda a amplitude de classes de diâmetro, com destaque para a equação número 1 ($VF = -16,0666 + 0,244099 * DAP + 0,109968 * GE - 0,00826033 * APC + 0,0000153755 * APC^2$).

As equações volumétricas que adotaram exclusivamente variáveis de copa obtiveram resultados estatísticos similares às equações de simples entrada (com DAP) em estudos dendrométricos na Amazônia. O melhor ajuste foi obtido pela equação 3 ($VF = 9,88824 + 0,0148461 * DC^2 - 20,3348 * IA + 0,00000879273 * MC^2$), a qual deve ser empregada para futuros planejamentos operacionais do manejo, quando se realizar o perfilamento florestal pelo LIDAR aerotransportado.

Capítulo 2

Figueiredo, E.O.; d'Oliveira, M.V.N.; Fearnside, P.M.; Braz, E.M.; Papa, D.A. 2014. Equações para estimativa de clareiras em área de manejo florestal de precisão na Amazônia pela morfometria das copas obtidas com LIDAR. Submetido à *Revista Árvore*.

EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CLAREIRAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL DE PRECISÃO NA AMAZÔNIA PELA MORFOMETRIA DAS COPAS OBTIDAS COM LIDAR

RESUMO

A técnica de manejo de precisão em florestas tropicais ainda apresenta um grande campo a ser melhorado com a incorporação de técnicas de biometria florestal e do perfilamento florestal com LIDAR aerotransportado. Quando se planeja o corte de uma árvore em manejo florestal, estima-se o volume a ser produzido para a indústria, mas não é considerada a área de abertura pela sua retirada. O objetivo deste estudo foi desenvolver equações para floresta tropical na Amazônia capazes de estimar a área de impacto de clareiras individuais de árvores dominantes e codominantes a partir da morfometria da copa obtida por meio do perfilamento florestal. Em duas oportunidades distintas, foi realizado o perfilamento em uma unidade de produção anual na Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil: a primeira, dias antes do início da exploração (2010), e a segunda, após a conclusão das atividades (2011). Com mensurações de campo e processamento da nuvem de pontos do LIDAR, foram obtidas variáveis dendrométricas e de morfometria da copa para desenvolver equações visando estimar a clareira. Foi empregado o método de todos os modelos possíveis, considerando a inclusão de 2 a 4 parâmetros. Previamente, foram avaliadas as variáveis explicativas com maior correlação com a clareira. Foram selecionadas dez equações e destas duas foram indicadas para uso, com $R^2_{aj} > 75\%$ e $S_{yx} < 23\%$. O bom ajuste das equações demonstra o potencial do uso do LIDAR visando obter informações para se estimar previamente as clareiras pela extração de árvores de diferentes dimensões.

Palavras-chave: modelo de regressão linear, perfilamento florestal, exploração florestal, floresta tropical.

EQUATIONS TO ESTIMATE TREE GAPS IN A PRECISION FOREST MANAGEMENT AREA THE AMAZON BASED ON CROWN MORPHOMETRY OBTAINED WITH LIDAR

ABSTRACT

The precision forest management technique still has much to be improved with the incorporation of forest biometric techniques and forest profiling with airborne LIDAR. When planning the cutting of a tree in forest management, the volume to be produced for industry is estimated but not the area impacted by removal of the tree. The objective of the present study was to develop equations for the Amazon rainforest that are able to estimate the impact area of gaps from harvesting individual dominant and co-dominant trees based on the crown morphology obtained through forest profiling. On two separate occasions profiles were made in an annual forest-production unit in the Antimary State Forest (FEA) in the state of Acre, Brazil. The first was done a few days before the start of logging in 2010 and the second was done after completion of harvest activities in 2011. With field measurements and processing of the cloud of LIDAR points, dendrometric and morphometric variables were obtained for the crown in order to develop equations for estimating gap areas. After evaluation of the explanatory variables with the highest correlation with gap area, the method used considered all possible models and included 2-4 parameters. Ten equations were selected, of which two were chosen for use; these had $R^2_{aj} > 75\%$ e $S_{yx} < 23\%$. The good fit of the equations demonstrates the potential use of LIDAR to obtain information for estimating in advance the gaps in the forest cover that will be created from harvesting trees of different sizes.

Keywords: linear regression model, forest profiling, logging, rainforest.

INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, a exploração madeireira pelas técnicas de manejo florestal era considerada precursora de impactos inevitáveis ao remanescente florestal devido aos escassos estudos, informações e emprego de técnicas e equipamentos inadequados.

Atualmente, os planos de manejo florestal são licenciados pelos órgãos ambientais com base em critérios que buscam, principalmente, minimizar os impactos da exploração sobre a diversidade de espécies florestais, a exemplo da manutenção de um mínimo de espécies remanescentes. Dessa forma são exploradas cerca de três árvores dominantes ou codominantes por hectare.

As florestas naturais estão normalmente em uma situação de estabilidade (Oliver *et al.* 1998; Hubbell *et al.* 1999), com baixo incremento, que é alterado somente quando sofrem algum impacto, como a exploração florestal. Neste momento, um incremento maior das espécies de interesse pode ser estimulado. Para isso deve-se saber o local e tamanho das possíveis novas aberturas de luz.

O controle dos danos até pouco tempo era apenas realizado pela equipe de campo (operadores de motosserras e de máquinas florestais), e o engenheiro florestal pouco poderia contribuir para a redução dos impactos por meio de seu planejamento prévio da exploração florestal. Com o emprego de técnicas de manejo de precisão (Figueiredo *et al.* 2007) é possível planejar no escritório e com bom nível de acurácia a localização de pátios, estradas, trilhas de arraste e ainda fornecer importantes informações ao operador de motosserra para a realização do corte de árvores com baixo impacto sobre a floresta remanescente, tudo isso disponível à equipe de campo em um navegador GPS por meio de mapas dinâmicos e interativos.

A técnica de manejo de precisão em florestas tropicais ainda apresenta um grande campo a ser melhorado com a incorporação de técnicas de biometria florestal e perfilamento florestal de larga escala.

O perfilamento florestal possibilita empregar variáveis da morfometria da copa ainda pouco empregadas e conhecidas no manejo de florestas tropicais (Hasenauer *et al.* 1995; Popescu *et al.* 2003). As dificuldades de coleta em campo fazem com que as variáveis morfométricas sejam preteridas, porém, a utilização do *Light*

Detection And Ranging (LIDAR) aerotransportado facilita a obtenção de dados de copa de forma rápida e segura.

Quando se planeja a retirada de uma árvore em manejo florestal, estima-se o volume para a indústria, mas não se conhece e nem é estimada a área impactada do corte dessa árvore sobre a população restante. No entanto, é possível construir equações capazes de estimar o impacto das clareiras geradas pelo corte de árvores por meio de variáveis obtidas com o uso do LIDAR aerotransportado.

As dimensões das clareiras determinam as condições ambientais e influenciam na sobrevivência e crescimento das plantas dentro de sua abrangência, em decorrência das modificações de suas condições locais de luminosidade, temperatura, umidade, ventos entre outros fatores (Lopes 1993; d'Oliveira e Braz 2006). Portanto, é estratégico conhecer e até mesmo prever o tamanho das clareiras quando se promove uma intervenção florestal de colheita.

O objetivo deste estudo foi desenvolver equações para a floresta tropical na Amazônia capazes de estimar a área de impacto de clareiras individuais de árvores dominantes e codominantes, a partir da morfometria da copa obtida por meio do perfilamento florestal com LIDAR aerotransportado.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

Os dados utilizados para testar a metodologia foram obtidos de uma área de manejo florestal pertencente à Floresta Estadual do Antimary (FEA), localizada nos municípios de Bujari e Sena Madureira, no Estado do Acre, Brasil, em uma área de 315 hectares, com exploração florestal realizada entre os meses de julho e setembro de 2010.

De acordo com o Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre (Acre 2000), a região onde está inserida a FEA apresenta precipitação anual média de 2.000 mm, temperatura média de 25 °C e uma estação seca nos meses de junho a setembro. A floresta é constituída por três fisionomias florestais principais: densas, abertas e abertas com bambus (tabocas). Os solos predominantes são latossolos amarelos

distróficos e a topografia suave ondulada com elevação máxima em torno dos 300 metros.

Perfilamento florestal com o LIDAR aerotransportado

O perfilamento pelo LIDAR ocorreu em duas oportunidades distintas: a primeira, dias antes do início da exploração florestal entre 29 de maio e 3 de junho de 2010, e a segunda após a conclusão das atividades de exploração entre os dias 20 e 23 de maio de 2011.

Para o perfilamento foi utilizado o sistema Optech ALTM 3100 EA acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II, modelo Neiva/Embraer 810C. O voo foi realizado à velocidade média de 210 km.h^{-1} , em uma altitude de 300 m, diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15° , frequência de varredura de 58,7 Hz (d'Oliveira *et al.* 2012). A intensidade média de perfilamento foi de 43,03 pontos. m^{-2} para o levantamento pré-exploratório e de 22,92 pontos. m^{-2} para o pós-exploratório.

Os dados de reflexão do LIDAR foram inicialmente estruturados em dois arquivos (pré e pós-exploração), formando um mosaico de 315 hectares e cerca de 135 milhões de pulsos. Os arquivos foram processados em base tridimensional em software específico (Quick Terrain Modeler).

Inventário florestal e composição da amostra das árvores dominantes e codominantes

Para o planejamento da exploração florestal da unidade de produção anual de 2010 do plano de manejo foi realizado um inventário florestal censitário para todos os indivíduos de interesse comercial acima de 30 cm de diâmetro à altura do peito ($\text{DAP}_{1,3\text{m}}$), considerando as técnicas recomendadas pelo manejo de precisão (Figueiredo *et al.* 2007). Assim foi realizada a identificação e localização geográfica das árvores e obtenção dos pontos barométricos calibrados por meio de GPS de alta

sensibilidade. As exsicatas das espécies que compõem a amostra foram depositadas no Herbário da Universidade Federal do Acre (UFAC/PZ).

A amostra foi estruturada em 134 árvores e clareiras de forma proporcional e estratificada por classe diamétrica das árvores de interesse comercial (Tabela 1). As árvores da amostra foram cortadas, cubadas pelo método Smalian e suas clareiras mensuradas.

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes para o ajuste dos modelos de clareiras.

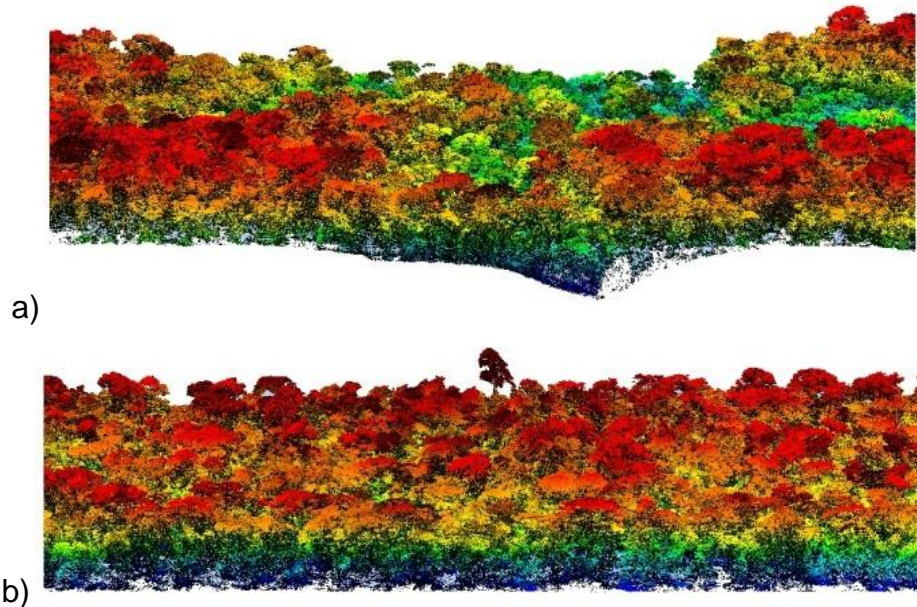
Table 1 - *Proportional sampling data base stratified by diameter class of the dominant and codominant trees for use in fitting the tree-gap models.*

Classes diamétricas	Intervalo das classes (cm)	Nº de indivíduos da população inventariada	%	Nº de indivíduos para o ajuste dos modelos de clareira	%
I	45 f 75	1.294	61,88	82	61,19
II	75 f 105	570	27,26	37	27,61
III	105 f 135	174	8,32	10	7,46
IV	135 f 165	53	2,53	5	3,73
Total		2.091	100,00	134	100,00

Obs.: Tabela não apresentada no artigo da Revista *Árvore*.

Pré-processamento e isolamento das árvores de interesse

Inicialmente, foi gerado um Modelo Digital do Terreno (MDT) a partir da classificação automática dos pontos do laser que alcançaram o solo com valores de classificação 2. Posteriormente, foi realizada uma subtração dos valores de elevação do MDT do arquivo completo de nuvem de pontos (Applied Imagery 2010). Essa operação permite gerar um modelo normalizado da nuvem de pontos, ou seja, sem o efeito da elevação do terreno, o que possibilita destacar a copa das árvores de interesse que são dominantes e codominantes na floresta, simplificando a obtenção dos dados de morfometria da copa (Figura 1).



Obs.: Figura não apresentada no artigo da Revista *Árvore*.

Figura 1 - a) Nuvem de pontos do LIDAR sem processamento de normalização e b) nuvem de pontos normalizada a partir da subtração dos valores de elevação do MDT.

Figure 1 - a) *Cloud of LIDAR points without normalization processing and b) normalized point cloud based on subtraction of the DTM elevation values.*

A etapa seguinte foi a aplicação de filtros de cores considerando a altura normalizada e a textura da superfície alvo, seguida do emprego de um controle de reflexão denominado de *Voxel Autosize*, em que pontos projetados na superfície são processados em tamanhos diferentes, com base em sua posição em relação ao plano de visualização, ou seja, pontos que estão próximos ao plano de visualização ficam maiores, enquanto os pontos que estão longe do plano de visualização ficam menores (Applied Imagery 2010). Esse processo permite delimitar o contorno de árvores dominantes e codominantes, facilitando a etapa seguinte de isolamento das árvores de interesse.

As árvores da amostra foram isoladas da nuvem de pontos por meio da confecção de um polígono tridimensional na região do entorno da copa. Posteriormente, foi eliminado o conjunto de pontos que forma a vegetação do sub-bosque a qual está abaixo da copa da árvore de interesse. Para isso, empregou-se o procedimento de confecção de polígonos e recortes sucessivos.

Variável dependente oriunda da mensuração de clareiras

A área impactada pela queda da árvore cortada foi a variável de interesse a ser modelada. Para isso foram localizadas e mensuradas em campo as clareiras de

134 árvores da amostra, por meio de receptor GPS L1 pós-processado de alta sensibilidade e um telêmetro de precisão centimétrica. A base de referência de pós-processamento foi a estação RIOB 93911 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas (GNSS).

A mensuração das clareiras em campo foi realizada considerando o conceito de área da clareira por Runkle (1981), que usa o maior comprimento entre uma borda e outra da clareira e a maior distância perpendicular ao comprimento, adequados à fórmula da elipse, além da mensuração da zona do fuste. Esta opção conceitual segue a tendência de vários estudos (Brokaw 1982; Runkle 1982; Almeida 1989; Barton *et al.* 1989; Tabarelli e Mantovani 1999) os quais consideram que a maioria das clareiras possuem o formato de uma elipse.

O perímetro (m) e área das clareiras (m²) originaram-se do processamento e mensuração da nuvem de pontos do perfilamento florestal pós-exploratório, seguindo o mesmo procedimento metodológico para o isolamento das árvores de interesse (Figura 2).

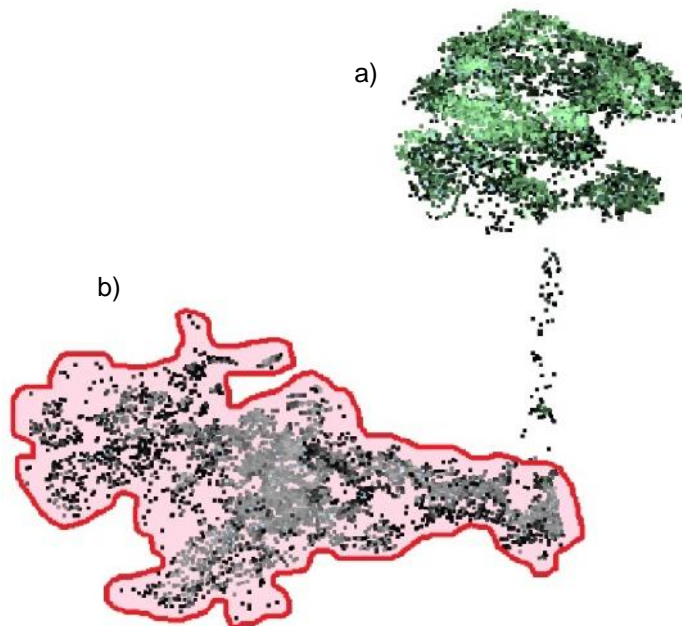


Figura 2 - Nuvens de pontos do LIDAR: a) árvore de interesse *Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang (perfilamento pré-exploratório) e b) clareira gerada pelo corte da árvore (perfilamento pós-exploratório) e a demarcação da área de impacto.

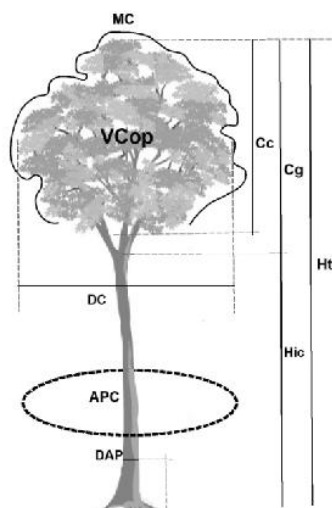
Figure 2 - Clouds of LIDAR points: a) tree of interest *Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang (pre-harvest profiling), and b) gap generated by cutting the tree (post-harvest profiling) and demarcation of the area of impact.

Variáveis independentes obtidas da morfometria da copa e do fuste

A base de dados das variáveis independentes dos modelos para estimativa da área de clareira das árvores cortadas no manejo florestal foi estruturada inicialmente com a inclusão de 17 variáveis dendrométricas do fuste e da morfometria da copa.

As variáveis do fuste foram: diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m acima do solo ou acima de quaisquer sapopemas - DAP (cm), área basal - G (m^2) e volume do fuste (m^3) mensurado por cubagem rigorosa pelo método de Smalian. As demais variáveis foram extraídas da morfometria da copa (Figura 3), com base no conceito de Burger (1939) sendo: comprimento de copa (Cc), comprimento da galhada (Cg), diâmetro médio da copa (DC), altura total da árvore (Ht), proporção de copa ($PC = Cc/Ht$), grau de esbeltez ($GE=Ht/DAP$), índice de saliência ($IS=DC/DAP$), índice de abrangência ($IA=DC/Ht$), formal de copa ($FC=DC/Cc$), índice de espaço vital ($IEV=(DC/DAP)^2$), altura de inserção da copa (Hic), volume de copa pelo sólido de rotação que melhor modela a copa ($VCop$), área de projeção de copa (APC) e manto de copa (MC).

As variáveis $VCop$, APC e MC foram obtidas na forma digital pelo LIDAR, sem a averiguação de campo, em decorrência da dificuldade de mensurar essas informações na floresta. As outras 14 variáveis foram alcançadas pelo processamento da nuvem de pontos e conferidas em campo.



Em que:

Cc = Comprimento de copa (m)

Cg = Comprimento de galhada (m)

DC = Diâmetro médio da copa (m)

Ht = Altura total da árvore (m)

DAP = Diâmetro à altura do peito a 1,3 m/coletado em campo (cm)

Hic = Altura de inserção da copa (m)

APC = Área de projeção de copa (m^2)

VCop = Volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m^3)

MC = Manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m^2)

Figura 3 - Variáveis morfométricas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).

Figure 3 - Tree morphometric variables using LIDAR data and DBH. Adapted from Burger (1939).

Desenvolvimento dos modelos para estimativa da área de clareira das árvores cortadas

As clareiras das 134 árvores dominantes e codominantes foram analisadas para determinar a intensidade da relação linear entre a variável dependente e as explicativas, indicando inicialmente as variáveis mais significativas para construção dos modelos.

As variáveis explicativas com coeficiente de correlação inferior a -0,65 e superior a 0,65 foram submetidas a uma rotina de seleção de todos os modelos possíveis (Ryan 2011), considerando a combinação de variáveis para construção de modelos que ponderam a inclusão de 2 a 4 parâmetros (β_i), sem multicolineariedade, com distribuição normal dos resíduos, independentes e homocedásticos. Para isso, foram realizadas as seguintes estatísticas: matriz de multicolineariedade, distribuição do erro padronizado, teste de Durbin-Watson (DW) e o F-máximo de Hartley (Sas 1990; Statgraphics 2006).

Para os modelos propostos pela rotina de construção foram obtidas equações de estimativas das clareiras e examinada a significância estatística de cada variável adicionada à equação pelo teste de Fischer (teste F). As variáveis com nível de significância $< 0,15$ foram retiradas do polinômio visando a sua simplificação.

Análise de influência

Foi realizada uma análise de influência das observações independentes, considerando individualmente cada equação de clareira ajustada. Para ser classificada como uma observação influente, esta deve provocar alterações substanciais nos valores calculados da estatística na presença e na ausência da observação.

Os impactos das possíveis observações influentes para modelos lineares foram mensurados pelos seguintes medidores de atipicidade: elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS e distância de Cook's, conforme descritos por Chatterjee e Hadi (1986), Souza (1998), Figueiredo (2005) e Statgraphics (2006).

Crítérios para escolha da melhor equação ajustada

Após o resultado da rotina de todos os possíveis modelos, a seleção da melhor equação foi baseada na análise gráfica dos resíduos em porcentagem, no

erro padrão absoluto e percentual (S_{yx} e $S_{yx}\%$), no critério $Press_p$ e no coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj}\%$) (Sas 1990; Souza 1998; Figueiredo 2005; Statgraphics 2006).

RESULTADOS

Das 17 variáveis explicativas potenciais para compor os modelos de regressão, apenas oito variáveis apresentaram forte correlação positiva ($X > 0,65$) com as áreas de clareiras (Tabela 2). As quatro variáveis com maior correlação foram todas oriundas da morfometria da copa, as quais são obtidas facilmente das árvores dominantes e codominantes pelo processamento da nuvem de pontos do LIDAR.

Tabela 2 - Resultados da correlação entre as variáveis independentes e a área de clareira de árvores cortadas em condições de manejo florestal, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 2 - Results of the correlation between the independent variables and the gap area of trees cut under conditions of forest management, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Variáveis explicativas selecionadas pelo critério de correlação ($-0,65 < X < 0,65$; $n = 134$) com a área de clareira			Variáveis explicativas excluídas da análise, devida à fraca correlação ($-0,65 < X < 0,65$; $n = 134$) com a área de clareira		
Ordem	Variável independente	Correlação (r)	Ordem	Variável independente	Correlação (r)
1	IA	0,67	1	GE	-0,46
2	DAP	0,70	2	FC	-0,26
3	G	0,70	3	Hic	0,16
4	VF	0,71	4	IEV	0,17
5	DC	0,80	5	IS	0,20
6	APC	0,81	6	Cg	0,44
7	MC	0,81	7	PC	0,45
8	VCop	0,83	8	Ht	0,53
			9	Cc	0,55

Em que: APC = área de projeção de copa (m^2); Cc = comprimento de copa (m); Cg = comprimento de galhada (m); DAP = diâmetro à altura do peito a 1,3 m/coletado em campo (cm); DC = diâmetro médio da copa (m); FC = DC / Cc - formal de copa; G = área basal (m^2); GE = Ht / DAP - grau de esbeltez; Hic = altura de inserção da copa (m); Ht = altura total da árvore (m); IA = DC / Ht - índice de abrangência; IEV = $(DC / DAP)^2$ - índice de espaço vital; IS = DC / DAP - índice de saliência; MC = manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m^2); PC = $(Cc / Ht) \times 100$ - proporção de copa (%); VCop = volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m^3) e VF = volume total do fuste (m^3).

Considerando o mesmo critério de classificação de Jardim *et al.* (2007) em que dividiu-se as clareiras em três categorias de tamanho: pequenas ($200 m^2 < \text{área} < 400 m^2$), médias ($400 m^2 < \text{área} < 600 m^2$) e grandes ($> 600 m^2$). O atual estudo encontrou 47 clareiras pequenas (35,1% da amostra), com média de $302,7 m^2 \pm 70,7 m^2$; 50 clareiras de médio porte (37,3% da amostra), com média de $489,4 m^2 \pm$

47,6 m² e 37 clareiras grandes (27,6% da amostra), com média de 835,9 m² +/- 274,6 m². Assim, as dimensões das clareiras oscilaram entre 406,3 m² e 1.238,4 m² e a média foi de 526,28 m² +/- 45,89 m² (n=134).

A dimensão média da área de projeção de copa (APC) foi de 344,27 m² +/- 41,86 m² (n=134), enquanto para o volume de copa (VCop) foi de 2.427,21 m³ +/- 426,72 m³ (n=134) e a média do DC foi de 21,29 m² +/- 1,21 m² (n=134).

Ao testar as possíveis combinações de variáveis pela rotina de "seleção de todos os modelos possíveis" (Statgraphics 2006), foram escolhidas 21 equações promissoras para estimativa da área de clareira. Essa metodologia considera a análise de todos os submodelos compostos pelos possíveis conjuntos das "p" variáveis indicadas pela matriz de correlação e identifica os melhores resultados, conforme critérios de avaliação pré-estabelecidos. Porém, 11 equações apresentaram problemas de variáveis multicolineares e/ou não significativas pelo teste F, exigindo nas duas situações uma avaliação da permanência ou não da variável no modelo. Nos casos em que ocorreu a retirada da variável com multicolineariedade severa ou não significativa (teste F) para o modelo, houve a necessidade de ajustar uma nova equação e repetir as análises estatísticas (Tabela 3).

Tabela 3 - Equações e estatísticas para estimativa da área de clareira das árvores cortadas em manejo florestal na Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 3 - Equations and statistics for estimating the gap areas of trees felled during forest management in the Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Nº	Equação	R ² _{aj} (%)	S _{yx} (m ²)	S _{yx} (%)	Resíduos (m ²)	Press _p (m ⁴)
1	Clareira = 306,565 + 0,0851602.VCop+ i	82,05	95,4	18,86%	0,022	1011369,84
2	Clareira = 439,125 - 602,974.IA + 0,805737.DC ² + i	75,33	111,8	22,12%	0,056	1571977,251
3	Clareira = 230,207 + 0,820571.APC+ i	73,90	115,0	22,75%	-0,023	1723238,411
4	Clareira = 162,203 + 334,015.G ^{1/2} + 0,0637074.VCop+ i	72,43	137,1	24,58%	-0,029	2422040,504
5	Clareira = 295,532 + 179,778.G + 0,0649801.VCop+ i	71,88	138,4	24,83%	0,027	2504829,272
6	Clareira = -4,90647 + 42,0059.DC - 691,587.IA+ i	71,35	120,5	23,83%	-0,046	1725630,345
7	Clareira=332,621+0,0000646243DAP ³ +0,0707149VCop+ i	70,84	141,1	25,42%	-0,006	2656753,579
8	Clareira = 298,173 + 0,000743911.APC ² + 257,136.G+ i	70,69	102,7	20,19%	-0,034	1212166,116
9	Clareira=338,788+0,000862964APC ² +0,000124014.DAP ³ + i	70,36	100,3	19,94%	-0,005	1138927,167
10	Clareira = 158,119 + 11,8687.DC + 0,0551438.VCop+ i	68,77	125,9	23,67%	0,040	1991924,145

Em que: R²_{aj}(%) = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}(m²) = erro padrão da estimativa; S_{yx}(%) = erro padrão da estimativa em percentual; Resíduos (m²) = somatório dos resíduos, Press_p(m⁴) = soma dos quadrados do erro da predição e i = estimativa do erro. As variáveis APC, DAP, DC, G, IA e VCop foram citados anteriormente.

Na Figura 4 observa-se a análise gráfica dos resíduos percentuais das equações para estimativa da área de clareira de árvores individuais.

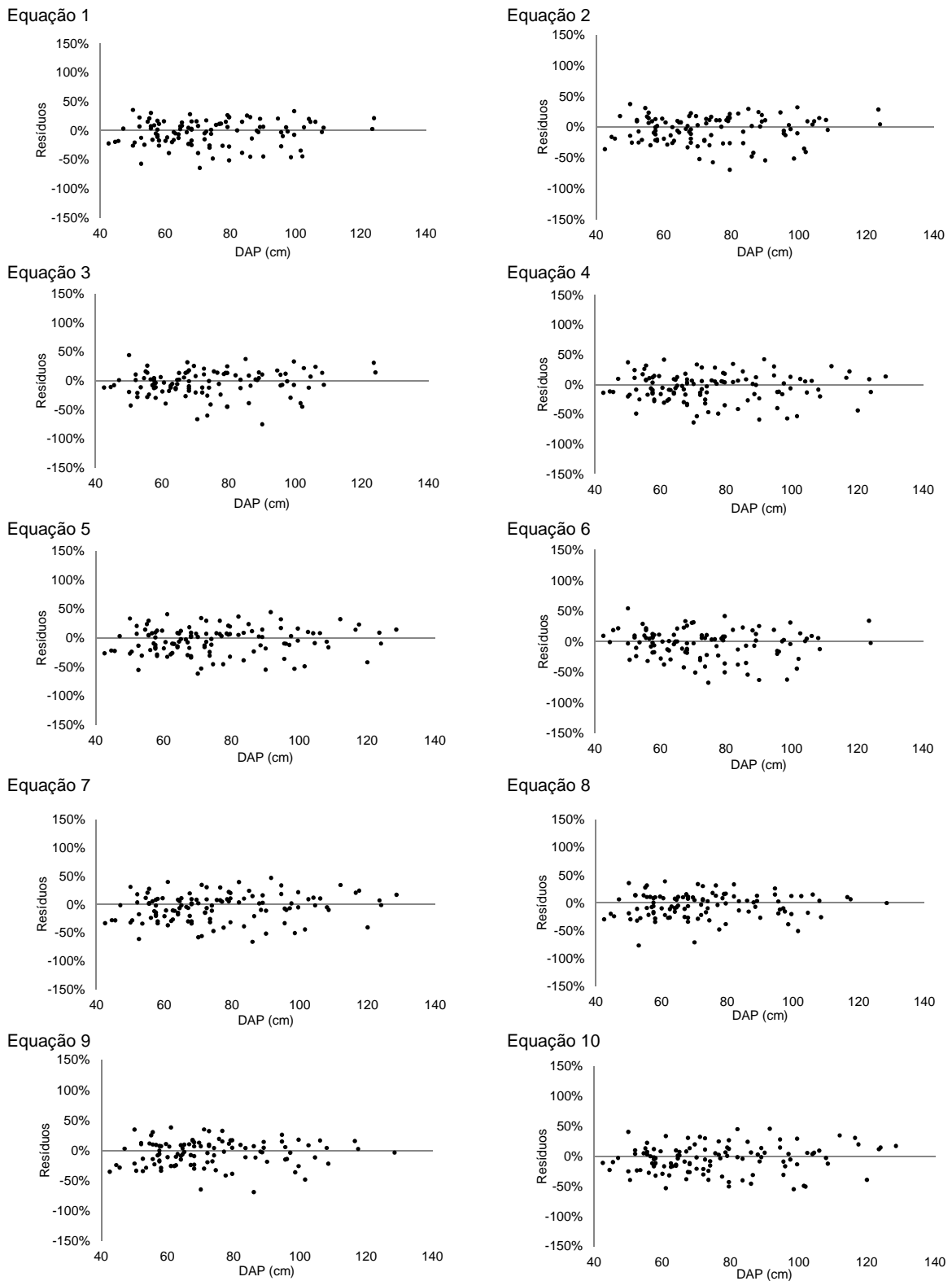


Figura 4 - Gráfico de distribuição dos resíduos percentuais para as equações 1 a 10, Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.

Figure 4 - Graph of the distribution of percentage residuals for equations 1 to 10, Antimary State Forest, Acre, Brazil.

DISCUSSÃO

A matriz de correlação entre as variáveis independentes e a variável a ser modelada é um importante instrumento de seleção prévia das variáveis que podem compor o modelo de estimativa.

As variáveis VCop, MC, APC e DC mantiveram a tendência de crescerem seus valores, na medida que também crescem os valores da área impactada pela clareira. Isso é mais nitidamente observado nas médias e grandes copas com diâmetro superior a 20 m, cujo espaço é dominado por *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro), *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (samaúma), *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr. (cumaru-cetim) e *Couratari oblongifolia* Ducke et R.Knuth (tauari).

Para as nove variáveis independentes fora do critério de correlação positiva ou negativa ($-0,65 < X < 0,65$), não foi observada nenhuma tendência clara de aumento ou redução dos valores, quando relacionadas com a área de clareira (Tabela 2), caracterizando nessa situação uma dispersão dos dados preditores, principalmente, na amplitude de clareira entre 600 e 900 m².

Uma das estratégias do manejo em florestas nativas é a realização da exploração das árvores aptas para corte de maneira que provoque o menor dano ao estoque remanescente que irá compor as futuras colheitas. Portanto, um importante indicador de exploração florestal é a área impactada pelas clareiras.

Considerando a classificação de Jardim *et al.* (2007), as 134 clareiras que compõem a amostra resultaram em uma distribuição equitativa dentro das classes de tamanho, porém, mais de 60% das áreas foram classificadas como médias e grandes. Este resultado é fortemente relacionado com a seleção das árvores a serem exploradas no manejo, que sempre prioriza a escolha para corte de indivíduos dominantes e codominantes, ou seja, com uma maior área de projeção de copa (APC) e, conseqüentemente, um maior volume de copa (VCop) e fuste. Resultados semelhantes também foram obtidos por Almeida (1989) e Martins (1999), estudando clareiras em florestas nativas.

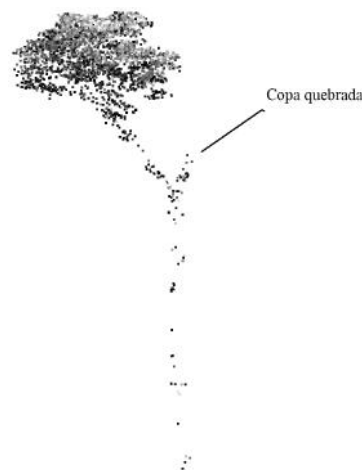
Jardim *et al.* (2007), Denslow e Hartshorn (1994) concluem que as clareiras de grande porte constituem locais desfavoráveis para o crescimento da maioria das espécies de interesse comercial e favorecem o desenvolvimento de espécies heliófilas indesejáveis. Assim, uma seleção mais equilibrada das árvores a serem

exploradas, que considere as informações de morfometria da copa, seria benéfica à qualidade da floresta remanescente.

A área de projeção de copa - APC (m^2) e o volume de copa - VCop (m^3) remetem à origem do conceito de dominância horizontal, que é definido pelo espaço volumétrico que a árvore ocupa no ecossistema (Scolforo 1998). As dificuldades de mensurar essa dominância espacial, fizeram com que se empregasse a área basal na altura do DAP_{1,3m} para correlacionar com a dominância espacial. Porém, quando se consideram as árvores que alcançaram o dossel superior da floresta, é possível resgatar o uso do conceito original de dominância espacial, por meio do emprego do perfilamento a laser aerotransportado considerando ainda levantamentos florestais de larga escala e com precisão centimétrica.

As variáveis VCop e DC são fortemente correlacionadas com a área impactada pela clareira e apresentam uma tendência positiva de crescimento com o DAP e G. Assim, na medida em que as variáveis DC e VCop crescem, o DAP também aumenta, indicando que grandes estruturas de copa demandam grandes dimensões de fuste.

As discrepâncias entre o tamanho da copa e o DAP observadas em menos de 3% da amostra, apontam as árvores de copas quebradas e incompletas (Figura 5) nitidamente reveladas pelo processamento da nuvem de pontos do LIDAR. Essas árvores foram retiradas da base de dados pela análise de influência.



Obs.: Figura não apresentada no artigo da Revista *Árvore*.

Figura 5 - Nuvens de pontos do LIDAR de uma árvore com a copa quebrada da espécie *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro), Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.

Figure 5 - LIDAR point cloud for a tree of the species *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro) with a broken canopy, Antimary State Forest, Acre, Brazil.

As equações 4, 5, 7, 8 e 9 escolhidas pela rotina de seleção de todos os modelos possíveis (Statgraphics 2006), apresentam diferentes intensidades de multicolineariedade, porém amenizadas pelo efeito da potência inteira ou fracionária das variáveis independentes (Tabela 3).

Os melhores resultados estatísticos podem ser observados nas equações 1 e 2, com destaque para a equação 1 que tem erro padrão médio percentual ($S_{yx}\%$) inferior a 25%, somatório dos resíduos tendendo a zero e coeficiente de determinação ajustado superior a 80%. A melhor equação (1) constituída pelo volume de copa (VCop) como única variável explicativa para estimar a clareira demonstra o potencial preditor da variável morfométrica, sendo essa informação é diretamente relacionada com a dominância espacial da árvore no ambiente florestal, corroborando com os resultados já relatados por Brokaw (1982) e Runkle (1990).

O volume de copa (m^3) - VCop é obtido por procedimento computacional extraído da base de dados do LIDAR e representa o espaço interno do sólido de rotação que melhor modela a copa, considerando folhas, galhos (grossos e finos) e os espaços vazios dentro da copa, portanto, não se trata de volume de madeira da copa e sim uma informação de arquitetura de copa do indivíduo observado. Esta informação morfométrica da copa apresenta significativa importância na estrutura horizontal e vertical na floresta. Já o perfilamento do fuste das árvores estudadas foi prejudicado pela densa vegetação do sub-bosque, onde poucos pontos do LIDAR conseguiram atingir o tronco (Figura 5).

A equação 2 teve o segundo melhor conjunto de resultados estatísticos, porém, com um erro padrão mais elevado. As variáveis independentes dessa equação buscam representar a copa no espaço tridimensional, com a incorporação do diâmetro médio da copa (DC) com efeito quadrático e o índice de abrangência da copa (IA) que é representada pelo quociente entre o DC e a altura total da árvore (Ht). A altura total da árvore isoladamente não atendeu o critério da matriz de correlação, visto que apresenta baixa relação com a clareira. No entanto, quando considerada no IA, a altura total também representa o conceito de dominância espacial na dimensão (X,Y,Z), no ambiente florestal e se aproxima dos valores estatísticos alcançados pela variável explicativa VCop (volume de copa).

A mensuração em campo do VCop para as árvores dominantes e codominantes é uma tarefa inexecutável e sua representação sem o uso da

tecnologia laser se dá pelos índices morfométricos da copa, representados por: proporção de copa, formal de copa, grau de esbeltez, índice de abrangência, índice de espaço vital e índice de saliência, os quais foram a base de inúmeros estudos sobre a copa, conforme Burger (1939), Dawkins (1963), Hasenauer *et al.* (1995), Pretzsch (1995), Durlo e Denardi (1998) e Cunha (2009).

Na equação 1, a distribuição dos resíduos percentuais ao longo da amplitude dos diâmetros não apresentou tendência de sub ou superestimativa e manteve o limite de erro padrão sempre inferior a $\pm 50\%$. As mesmas características de distribuição gráfica da equação 1 também foram observadas para a equação 2, porém, com erros mais dispersos entre os diâmetros de 80 a 100 cm, chegando a $\pm 69\%$ (Figura 4).

Para as equações 4 e 5 que tiveram alguma intensidade de multicolineariedade, pode-se observar uma distribuição dos resíduos sem tendências, porém, com maior dispersão ao longo das classes de diâmetro. As equações 7, 8 e 9 tiveram uma tendência de superestimativa chegando a valores superiores a 70%.

Com estatísticas de precisão inferiores, as equações 3 e 6 apresentaram tendência de superestimativa e maior dispersão dos resíduos no espaço do gráfico (+x,-y).

A literatura sobre equações para a estimativa de clareira por árvores individuais é escassa e a maioria dos estudos é direcionada às clareiras de causas naturais. A demanda para se estimar as clareiras das futuras explorações florestais em áreas de manejo surgiu com a adoção de técnicas de manejo de precisão nas atividades de planejamento e exploração em florestas tropicais. Assim, espera-se que o emprego mais rotineiro do LIDAR no planejamento florestal amplie as possibilidades de estudos para a previsão de impactos.

CONCLUSÃO

- As três melhores variáveis explicativas para modelar áreas de clareira, conforme matriz de correlação foram: volume da copa - VCop (m^3), manto da copa - MC (m^2) e área de projeção da copa - APC (m^2).
- As áreas das clareiras oscilaram entre 406,3 m^2 e 1.238,4 m^2 , com valor médio de 526,28 m^2 +/- 45,89 m^2 (n=134), sendo facilmente identificadas pelo perfilamento com LIDAR.
- Existe forte correlação entre as variáveis morfométricas do diâmetro médio de copa (DC) e volume da copa - VCop (m^3), com o DAP das árvores dominantes e codominantes.
- Os maiores diâmetros médios de copa (DC), com valor superior a 20 metros, foram encontrados apenas para as espécies *Dipteryx odorata* Wild (cumaru-ferro), *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (samaúma), *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr. (cumaru-cetim) e *Couratari oblongifolia* Ducke et R.Knuth (tauari).
- As árvores com copas danificadas ou quebradas podem ser identificadas pelo processamento do LIDAR e apontadas como "outliers" pela análise de influência.
- É possível estimar com precisão a área da clareira de árvores a serem cortadas sob manejo florestal, a partir de informações de morfometria da copa extraídas do processamento da nuvem de pontos do LIDAR aerotransportado. As equações recomendadas para o caso são: equação 1 - Clareira = 306,565 + 0,0851602. VCop + ϵ_i e equação 2 - Clareira = 439,125 - 602,974 .IA + 0,805737. DC² + ϵ_i .

Capítulo 3

Figueiredo, E.O.; Fearnside, P.M.; d'Oliveira, M.V.N.; Braz, E.M.; Papa, D.A. 2014. Estimativa de biomassa de fuste em área de manejo de precisão na Amazônia pela morfometria das copas obtidas com LIDAR.

ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE FUSTE EM ÁREA DE MANEJO DE PRECISÃO NA AMAZÔNIA PELA MORFOMETRIA DAS COPAS OBTIDAS COM LIDAR

RESUMO

A partir de dados de morfometria da copa de árvores dominantes e codominantes obtidas com LIDAR aerotransportado foram desenvolvidos modelos alométricos para estimar as biomassas verde e seca estocadas nos fustes. A base de dados foi formada por 142 árvores de uma floresta sob manejo na Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil. O método foi a seleção de todos os modelos possíveis e o teste de identidade de modelos feito de maneira a considerar os distintos grupos de densidade básica da madeira (baixa, média e alta). As variáveis morfométricas, associadas ou não à utilização do DAP como variáveis independentes, apresentaram alta correlação com a biomassa de fuste. Quando se calcula a biomassa do fuste considerando a densidade básica da madeira, a melhor estimativa é obtida usando equações alométricas com as variáveis de morfometria da copa e o DAP. Para se obter uma equação alométrica global que considere as classes de densidade básica da madeira (baixa, média e alta), deve-se empregar exclusivamente variáveis explicativas de copa ou incorporar para o caso de biomassa seca, as variáveis densidade básica (DB) e altura total (Ht).

Palavras-chave: modelo de regressão linear, LIDAR aerotransportado, exploração florestal, floresta tropical.

ESTIMATED BIOMASS OF BOLE IN THE MANAGEMENT AREA OF PRECISION IN THE AMAZON BY MORPHOMETRY OF CROWNS OBTAINED WITH LIDAR

ABSTRACT

Based on airborne LIDAR data on the canopy morphology of Amazon forest trees, we developed allometric models to estimate the dry biomass stored in the boles of dominant and codominant individuals and compared the results with those from equations based on traditional variables such as diameter at breast height (DBH). The database consisted of 142 trees in a forest under management for timber in Brazil's state of Acre. A set of all possible models was generated, followed by model selection and identity testing in order to compare groups of basic wood density (low, medium and high). The morphometric variables of the crown had high explanatory power for stem biomass independent of whether the allometric equations included DBH. When calculating bole biomass with equations that include basic wood density, the best estimate is obtained using variables for both DBH and crown morphology. To obtain an allometric equation that encompasses species in all three classes of basic density, one should either use only independent variables representing crown dimensions or complement these with variables for basic density (BD) and total height (Ht).

Keywords: linear regression model, forest profiling, logging, rainforest, airborne LIDAR, tropical forest.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve um grande avanço no planejamento e execução de operações florestais em planos de manejo florestal na Amazônia, promovido pela adoção de técnicas de manejo de precisão (Figueiredo *et al.* 2007) com o uso integrado de GPS e sistemas de informação geográfica.

Recentemente, foi demonstrado que o uso da tecnologia LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado tem larga aplicação no manejo de precisão de florestas tropicais, permitindo obter em grandes extensões de cobertura florestal informações sobre a estrutura do relevo e hidrografia com precisão submétrica (d'Oliveira *et al.* 2012). Dessa forma, o uso do perfilamento a laser possibilita ganhos de qualidade no planejamento (rede de estradas, pátios de estocagem e trilhas de arraste), monitoramento das operações florestais, estimativa do volume e da biomassa das florestas manejadas.

Apesar dos avanços tecnológicos da física ótica, sensoriamento remoto, geoprocessamento e informática (Lim e Treitz 2004; Næsset e Gobakken 2008; Hudak *et al.* 2012), ainda é necessário maior aprofundamento no conhecimento básico dos componentes florestais, a exemplo do entendimento da biomassa vegetal. Para Whittaker e Woodwell (1971), Vanclay (1994), Clark e Clark (2000), Scolforo *et al.* (2004), Scolforo *et al.* (2008), as formas de estimar a biomassa são empíricas uma vez que os modelos utilizados para descrever uma variável resposta não identificam as causas ou explicam os fenômenos que afetam o comportamento dessa variável. Equações alométricas utilizadas para estimar estoques de carbono, biomassa e volume em florestas têm sido normalmente elaboradas por meio de parcelas destrutivas, correlacionando as medições de árvores inteiras com duas variáveis de fácil obtenção em campo: altura e DAP (Higuchi *et al.* 1998; Silva 2007).

Variáveis morfométricas de copa possuem elevada correlação com os parâmetros dendrométricos do fuste como o DAP e a altura (Durlo e Denardi 1998; Orellana e Koehler 2008; Wink *et al.* 2012), no entanto, a obtenção dessas variáveis por meio da medição de árvores individuais em florestas tropicais é um grande desafio. Mesmo para medição de diâmetro e altura, o sub-bosque denso, troncos tortuosos e raízes escoras ou tabulares são um obstáculo à tomada de medidas precisas. Especialmente para as variáveis que não podem ser medidas diretamente em campo (ex. altura), deve ser considerado que o ganho produzido pela inclusão

dessa variável no modelo não será menor do que o erro produzido pela sua medição em campo (d'Oliveira *et al.* 2012).

Nesse ambiente, é impensável do ponto de vista prático a obtenção de variáveis morfométricas de copa em inventários florestais convencionais. Por outro lado, por meio do uso de dados do LIDAR é possível obter, com grande precisão, medições de altura total e de variáveis morfométricas de copas de árvores dominantes e codominantes.

O objetivo deste estudo foi desenvolver equações alométricas para estimativa da biomassa do fuste de árvores dominantes e codominantes em área de manejo florestal de precisão, a partir de parâmetros morfométricos das copas obtidos por meio do LIDAR e variáveis tradicionalmente empregadas como diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (Ht), densidade aparente (DA) e básica (DB) da madeira. Também foi avaliada a identidade de modelos por grupos de densidade da madeira.

MATERIAL E MÉTODOS

Local do estudo

Os estudos foram realizados em uma área de 315 hectares de manejo florestal pertencente à Floresta Estadual do Antimary (FEA) (Figura 1), sob Certificação SmartWood nº SW-FM/COC-1670 e Licença de Operação do Instituto de Meio Ambiente do Acre - IMAC, nº 530/2008 (renovação). A unidade de conservação está situada nos municípios de Bujari e Sena Madureira, no Estado do Acre.

A região onde está inserida a FEA apresenta precipitação anual média de 2.000 mm, temperatura média de 25 °C e uma estação seca nos meses de junho a setembro, período em que é realizada a exploração florestal. A floresta é constituída por três fisionomias principais: densas, abertas e abertas com bambus (tabocas). Estas três formas florestais ocorrem de maneira intermitente no ambiente estudado. Os solos predominantes são latossolos amarelos distróficos e a topografia suave ondulada com elevação máxima em torno de 300 metros (Acre 2000).

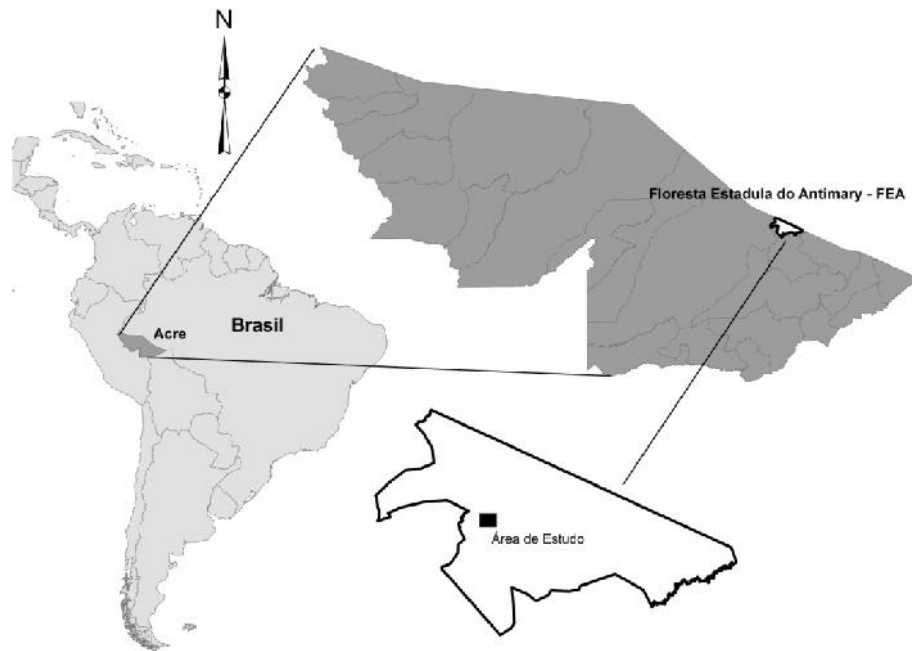


Figura 1 - Mapa de localização da Floresta Estadual do Antimary, Acre, Brasil.
Figure 1 - Location map of Antimary State Forest, Acre, Brazil.

Inventário florestal

Em 2009 foi realizado o inventário censitário, visando ao planejamento da exploração florestal da unidade de produção anual de 2010. O levantamento foi realizado considerando todas as espécies comerciais madeireiras com diâmetro à altura do peito (DAP_{1,3m}) acima de 30 cm. A localização das árvores e as técnicas de planejamento foram realizadas conforme os procedimentos preconizados pelo manejo de precisão (Figueiredo *et al.* 2007). Assim para cada árvore foi apropriada uma coordenada geográfica e um ponto barométrico por meio de GPS de alta sensibilidade. As exsicatas das espécies que compõem a amostra foram depositadas para identificação no Herbário da Universidade Federal do Acre (UFAC/PZ).

Dados LIDAR

O perfilamento pelo LIDAR ocorreu antes da exploração florestal entre 29 de maio e 3 de junho de 2010.

Para o perfilamento foi utilizado o sistema Optech ALTM 3100 (*Aerial Laser Terrain Mapper*) acoplado a um avião bimotor Piper Seneca II, modelo Neiva/Embraer 810C. O voo foi realizado à velocidade média de 210 km.h⁻¹, em uma

altura de 300 m, diâmetro do feixe de 20 cm, divergência do feixe de 0,3 mrad, ângulo de varredura de 15°, frequência de varredura de 58,7 Hz (d'Oliveira *et al.* 2012).

Como marco de partida no solo foi adotada a referência RBMC RIOB 93911 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas (GNSS). Os dados foram processados no sistema de coordenadas e zona (UTM e 19 Sul) e sistema de referência SIRGAS 2000, para isso foi utilizado um par de GPS Trimble 5700 com portadora L1/L2. A intensidade média de perfilamento foi de 43,03 pontos.m⁻².

Os dados de reflexão do LIDAR foram inicialmente estruturados em um único arquivo formando um mosaico de 315 hectares e cerca de 130 milhões de pulsos. Os arquivos foram processados em base tridimensional em software específico (Quick Terrain Modeler).

Quantificação do volume do fuste

A estrutura amostral das árvores dominantes e codominantes de interesse para exploração florestal em condições de manejo foi mensurada considerando uma amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica (Tabela 1).

Tabela 1 - Base de dados da amostragem proporcional estratificada por classe diamétrica da população de árvores dominantes e codominantes cubadas para o ajuste dos modelos alométricos.

Table 1 - Proportional sampling data base stratified by diameter class of the dominant and codominant trees with volumes measured for use in fitting allometric models.

Classes diamétricas	Intervalo das classes (cm)	Nº indivíduos da população inventariada	%	Nº indivíduos para o ajuste dos modelos de biomassa	%
I	45-75	1.294	61,88	86	60,56%
II	75-105	570	27,26	39	27,46%
III	105-135	174	8,32	12	8,45%
IV	135-165	53	2,53	5	3,52%
Total		2.091	100,00	142	100,00%

As árvores da amostra foram cortadas e cubadas pelo método Smalian. Após o corte das árvores, os tocos remanescentes foram georreferenciados por meio de receptor GPS L1 de alta sensibilidade e a base de referência de pós-processamento

foi a mesma utilizada como marco de partida no solo para a coleta e processamento da nuvem de pontos do LIDAR.

Por se tratar de árvores de interesse comercial madeireiras a serem manejadas, os indivíduos ocos ou com fuste tortuoso não foram cortados e nem incluídos na amostra deste estudo. Também foram respeitados critérios de exploração florestal normatizados em lei, referentes a espécies raras, árvores matrizes, manutenção das áreas de preservação permanente e localização geográfica estabelecidos pelo plano de manejo licenciado.

Quantificação da biomassa

Após o corte de cada árvore da amostra, foram retiradas cunhas em formas de prisma triangular reto com comprimento médio de 30 cm e espessura de 10 cm. As amostras de madeira (incluindo alburno e casca) foram retiradas da primeira e da última tora de cada árvore, utilizando uma motosserra.

Para obtenção da densidade aparente (peso verde/volume verde em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), as amostras foram imersas em água até atingirem peso constante, conforme preconizado pelo método da balança hidrostática (ABNT 2003). Para isso foi empregada uma balança eletrônica com 25 kg de capacidade e sensibilidade de 2 g. Posteriormente, a densidade básica (peso seco/volume verde) foi obtida após as amostras atingirem peso constante em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Com os dados da densidade das amostras de cada árvore de interesse, foram calculadas as biomassas verde e seca a partir do volume da cubagem rigorosa.

Processamento da nuvem de pontos do LIDAR para obtenção das variáveis morfométricas da copa

A copa de cada árvore amostrada foi identificada a partir do georreferenciamento em campo e, posteriormente, localizada na nuvem de pontos do LIDAR. O processamento dos dados foi realizado com o software Quick Terrain Modeler X64 por meio dos seguintes procedimentos:

- a) tratamento da nuvem de pontos com filtro de matizes com processamento conjunto dos dados de altura e textura da superfície alvo;
- b) controle de reflexão da nuvem de pontos, pelo método *Voxel Autosize*, em que pontos projetados na superfície são processados em tamanhos diferentes, com base em sua posição em relação ao plano de visualização, ou seja, pontos que estão próximos ao plano de visualização ficam maiores, enquanto os pontos que estão longe do plano de visualização ficam menores (Applied Imagery 2010). Esse processo facilita o desenho do contorno de árvores dominantes e codominantes, e conseqüentemente, agiliza a técnica de isolamento das árvores; e,
- c) separação das árvores da amostra da nuvem de pontos do LIDAR realizada por meio da confecção de um polígono tridimensional na região do entorno da copa. Inicialmente, foi recortada da nuvem de pontos total uma região que inclui a área de projeção da copa da árvore de interesse e o sub-bosque abaixo dessa copa. Na seqüência, a copa da árvore e a projeção do fuste foram isolados a partir da edição de polígonos e recortes sucessivos.

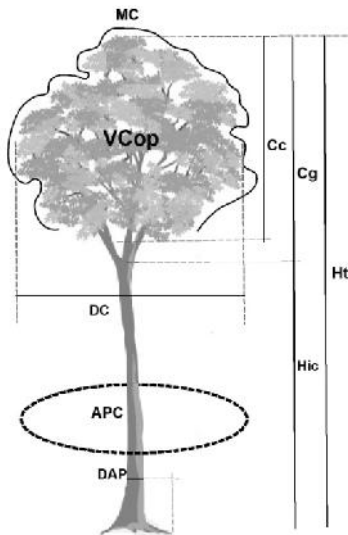
Variáveis explicativas

Foram utilizadas 18 variáveis independentes considerando dados do fuste, densidade aparente (DA), básica (DB) da madeira, altitude no solo na localização da árvore (Hsolo) e as variáveis morfométricas da copa.

As variáveis do fuste foram o diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m acima do solo ou acima de quaisquer sapopemas - DAP (cm) e altura de inserção da copa - Hic (m) ou altura comercial.

Da morfometria da copa (Figura 2) foram obtidas as seguintes variáveis adaptado de Burger (1939): comprimento de copa - Cc (m), comprimento da galhada - Cg (m), diâmetro médio da copa - DC (m), altura total da árvore - Ht (m), proporção de copa ($PC = Cc/Ht$), grau de esbeltez ($GE=Ht/DAP$), índice de saliência

($IS=DC/DAP$), índice de abrangência ($IA=DC/Ht$), formal de copa ($FC=DC/Cc$), índice de espaço vital ($IEV=(DC/DAP)^2$), volume de copa pelo sólido de rotação que melhor modela a copa - $VCop$ (m^3), área de projeção de copa - APC (m^2) e manto de copa - MC (m^2).



Em que:

Cc = Comprimento de copa (m)

Cg = Comprimento de galhada (m)

DC = Diâmetro médio da copa (m)

Ht = Altura total da árvore (m)

DAP = Diâmetro à altura do peito a 1,3 m, coletado em campo (cm)

Hic = Altura de inserção da copa (m)

APC = Área de projeção de copa (m^2)

VCop = Volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m^3)

MC = Manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m^2)

Figura 2 - Variáveis morfológicas da árvore empregando dados do LIDAR e DAP. Adaptado de Burger (1939).

Figure 2 - Tree morphometric variables using LIDAR data and DBH. Adapted from Burger (1939).

De todas as variáveis avaliadas, apenas as variáveis $VCop$, APC e MC foram obtidas exclusivamente na forma digital pelo processamento da nuvem de pontos do LIDAR, em decorrência da dificuldade de mensurar essas informações na floresta.

Equações alométricas para biomassa do fuste

Inicialmente foi avaliada a intensidade da relação linear entre as variáveis dependentes (biomassa seca - Bsc e biomassa verde - Bvd) e as explicativas. Essa etapa auxilia na indicação inicial de quais são as variáveis mais significativas para construção dos modelos (Statgraphics 2006).

Apenas as variáveis explicativas que apresentaram coeficiente de correlação inferior a -0,65 ou superior a 0,65 foram selecionadas para a rotina de seleção de todos os modelos possíveis (Ryan 2011). A inclusão de variáveis explicativas no desenvolvimento dos modelos alométricos foi limitada ao máximo de três, o que

possibilita modelos com até quatro parâmetros (β_{is}), incluindo o intercepto (β_0). A rotina de seleção foi processada em duas etapas separadamente, considerando a variável dependente biomassa seca (Bsc) e verde (Bvd).

Visando reduzir a grande quantidade de modelos inicialmente indicados pela rotina de seleção, também foram incorporados como critério de triagem: equações sem multicolineariedade, com distribuição normal dos resíduos, independentes e homocedásticos. Para isso, foram calculadas as seguintes estatísticas: matriz de multicolineariedade, distribuição do erro padronizado, teste de Durbin-Watson (DW) e o F-máximo de Hartley (Sas 1990; Statgraphics 2006).

Para os modelos propostos nos dois processamentos (Bsc e Bvd) pela rotina de seleção, foram obtidas equações de estimativa da biomassa e examinada a significância estatística de cada variável explicativa pelo teste de Fischer (teste F). As variáveis com nível de significância $< 0,15$ foram retiradas do polinômio visando sua simplificação.

Para cada equação alométrica desenvolvida, foi realizada análise de influência das observações independentes. A observação somente foi considerada influente quando produzia mudanças substanciais nos valores calculados da estatística na presença e na ausência da observação, mediante os seguintes medidores de atipicidade: elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS e distância de Cook's, conforme descritos por Chatterjee e Hadi (1986), Souza (1998), Figueiredo (2005) e Statgraphics (2006).

A seleção da melhor equação foi baseada na análise gráfica dos resíduos em porcentagem, no erro padrão absoluto e percentual (S_{yx} e $S_{yx}\%$), no critério $Press_p$ e no coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj}\%$) (Sas 1990; Souza 1998).

Identidade de modelos por grupo de densidade

Após a seleção da melhor equação alométrica para biomassas seca e verde, foi empregado o teste de identidade de modelos.

Por se tratar apenas de modelos lineares, optou-se pelo emprego do procedimento descrito por Graybill (1976), com a finalidade de avaliar a necessidade de ajustes por grupos de densidade básica ou individuais, considerando três diferentes classes de densidade básica (DB) da madeira: baixa - DBbx ($DB < 0,5$

g.cm⁻³); média - DBmd (0,5 g.cm⁻³ < DB < 0,7 g.cm⁻³) e alta - DBal (DB > 0,7 g.cm⁻³) (Nogueira *et al.* 2005; Vale *et al.* 2005).

O procedimento consiste na redução da soma dos quadrados. Para modelos lineares, o teste de identidade permite observar estatisticamente, por meio do teste F, a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões ajustadas para cada grupo de densidade básica isoladamente (modelo completo - ω) e a soma dos quadrados da regressão ajustada para conjunto dos três grupos de densidade básica estudados (modelo reduzido - w) (Scolforo 1998; Figueiredo 2005). Assim, estrutura-se um arranjo com o modelo completo e reduzido para proceder ao cálculo das estatísticas da identidade de modelos de regressão linear (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares

Table 2 - Analysis of variance for identity testing linear models

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Modelo completo	(Axp)	SQ _{Reg} (ω)		
Modelo reduzido	P	SQ _{Reg} (w)		
Diferença para testar hipótese	(A-1)p	SQ _{Reg} (ω) - SQ _{Reg} (w)	SQ _{(diferença)/(A-1)p}	QM _{(diferença)/QM_(resíduo)}
Resíduo	N-(Axp)	SQ _{Total} (ω) - SQ _{Reg} (ω)	SQ _{(resíduo)/N-(Axp)}	
Total	N	SQ _{Total} (ω)		

Em que: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = teste de Fischer; A = número de classes de densidades; ω = modelo completo; w = modelo reduzido; p = número de parâmetros do modelo reduzido (w); e N = número de observações do modelo completo (ω).

As hipóteses foram definidas da seguinte forma:

- H_0 = o modelo reduzido (w) ajustado para o conjunto $\{z\}$ de dados das classes de densidades estudadas é idêntico aos modelos completos ajustados para cada uma das classes pertencentes a $\{z\}$; e,
- H_1 = contrária a H_0 .

Foram testadas três hipóteses para grupos de densidade da madeira. O primeiro grupo (a) trata-se do ajuste com a base de dados original formada com espécies com densidade básica da madeira baixa, média e alta; o segundo grupo (b)

com as árvores de densidade básica baixa e média; e o terceiro e último grupo (c) com as árvores das espécies com densidade básica média e alta.

RESULTADOS

Considerando que a amostragem foi constituída apenas por árvores dominantes e codominantes de interesse comercial madeireiro, isso tipifica uma composição singular quando se compara com a estrutura florestal original, principalmente, quando se trata da composição florestal por densidade da madeira. A estrutura amostral estudada foi classificada como: 17,61% de espécies com densidade básica baixa ($DB < 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$); 40,84% com densidade básica média ($0,5 \text{ g.cm}^{-3} \leq DB < 0,7 \text{ g.cm}^{-3}$); e 41,55% com densidade básica alta ($DB \geq 0,7 \text{ g.cm}^{-3}$).

Quando foi comparada pelo teste T a densidade básica (DB) da madeira das amostras coletadas da base do fuste (primeira tora) e da extremidade superior (última tora), foi observada a existência de diferença estatística entre as densidades básicas médias da madeira da primeira e última tora ($t = 2,15$, $\alpha = 0,05$; $p = 0,03$). A densidade básica média da primeira tora ($0,695 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,033 \text{ g.cm}^{-3}$, $n = 142$) é 7,28% maior que a DB da madeira da última tora ($0,648 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,029 \text{ g.cm}^{-3}$, $n = 142$). Considerando a média geral da DB envolvendo as amostras da primeira e da última tora o resultado foi de $0,671 \text{ g.cm}^{-3}$ ($n = 142$) com um coeficiente de variação (CV) de 24,42%.

Já a densidade aparente (DA) média da madeira resultante da composição amostral da primeira e última tora foi de $0,962 \text{ g.cm}^{-3}$ e CV de 11,11%. Comparando as densidades aparentes da primeira e última tora, observou-se não haver diferença estatística entre os dois grupos ($t = 1,543$, $\alpha = 0,05$; $p = 0,124$). A DA média da base da árvore foi de $0,973 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,020 \text{ g.cm}^{-3}$ ($n = 142$) e a DA média da última tora $0,950 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,022 \text{ g.cm}^{-3}$ ($n = 142$).

O teor médio de umidade do fuste para a primeira tora foi $0,340 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,094 \text{ g.cm}^{-3}$ ($n = 142$) e para topo da árvore foi $0,336 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,104 \text{ g.cm}^{-3}$ ($n = 142$).

Nas equações testadas, em que as variáveis independentes foram apenas as de morfometria da copa, 14,1% das árvores amostradas, foram identificadas como pontos atípicos. Quando DAP foi incluído como variável independente no modelo, essa percentagem caiu para 6,3% e quando foram incluídos DAP e Ht para 4,9%.

Os resultados descritivos das principais variáveis explicativas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados descritivos das principais variáveis explicativas e volume do fuste de árvores dominantes e codominantes, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 3 - Descriptive results of the main explanatory variables and bole volume of dominant and codominant trees, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Descrição	Unidade	n	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Mínimo	Máximo
APC	(m ²)	142	354,1	235,2	66,43%	106,8	1713,8
Cc	(m)	142	10,3	3,9	37,90%	4,1	24,9
Cg	(m)	142	15,4	4,2	27,53%	6,1	25
DAP	(cm)	142	77,9	23,1	29,68%	44,5	164,5
DC	(m)	142	21,8	6,5	29,79%	12	49,1
Hic	(m)	142	23,7	4,5	19,18%	12,2	36,1
Ht	(m)	142	39,1	4,9	12,58%	26,4	53,7
MC	(m ²)	142	420,7	290,7	69,10%	112,6	2001,7
VCop	(m ³)	142	2495,9	2449,1	98,13%	235,2	14998,1
Vol	(m ³)	142	8,3	6,9	82,70%	1,5	55,9

Em que: APC = área de projeção de copa (m²); Cc = comprimento de copa (m); Cg = comprimento de galhada (m); DAP = diâmetro à altura do peito a 1,3 m/coletado em campo (cm); DC = diâmetro médio da copa (m); Hic = altura de inserção da copa (m); Ht = altura total da árvore (m); MC = manto de copa (área superficial do sólido de rotação em m²); VCop = volume pelo sólido de rotação que melhor modela a copa (m³); e, Vol = volume do fuste oriundo da cubagem rigorosa (m³).

Avaliar a correlação linear entre as variáveis explicativas e dependentes fornece um importante instrumento para a seleção inicial de variáveis explicativas, principalmente, quando se considera um grande número de possíveis variáveis de interesse, a exemplo dos resultados de correlação linear entre 18 variáveis de interesse, incluindo variáveis morfométricas de copa, ambientais e do fuste, com as variáveis dependentes de biomassa seca e verde do fuste (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultados da correlação entre as variáveis explicativas e as biomassas verde e seca das árvores cortadas em condições de manejo florestal, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 4 - Results of the correlation between the independent variables and the green and dry biomass of trees cut under conditions of forest management, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Correlação com a variável dependente biomassa verde do fuste - Bvd (n=142)			Correlação com a variável dependente biomassa seca do fuste - Bsc (n=142)		
Ordem	Variável explicativa	Correlação (r)	Ordem	Variável explicativa	Correlação (r)
1	GE	-0,65	1	GE	-0,57
2	IEV	-0,15	2	IEV	-0,13
3	IS	-0,13	3	IS	-0,12
4	DB	-0,12	4	Hsolo	0,03
5	DA	-0,08	5	DA	0,08
6	Hsolo	0,00	6	FC	0,11
7	FC	0,12	7	DB	0,14
8	Hic	0,26	8	Hic	0,28
9	Cg	0,36	9	PC	0,36
10	PC	0,38	10	Cg	0,42
11	Cc	0,51	11	IA	0,47
12	Ht	0,54	12	Cc	0,51
13	IA	0,56	13	Ht	0,60
14	DC	0,72	14	DC	0,66
15	VCop	0,77	15	APC	0,70
16	APC	0,77	16	MC	0,70
17	MC	0,79	17	VCop	0,72
18	DAP	0,92	18	DAP	0,83

Em que: APC, Cc, Cg, DAP, DC, Hic, Ht, MC e VCop citados anteriormente. DA = densidade aparente da madeira; DB = densidade básica da madeira; FC = DC / Cc - formal de copa; GE = Ht / DAP - grau de esbeltez; Hsolo = altitude do terreno a partir da mensuração do LIDAR; IA = DC / Ht - índice de abrangência; IEV = (DC / DAP)² - índice de espaço vital; IS = DC / DAP - índice de saliência; e PC = (Cc / Ht) x 100 - proporção de copa (%).

A análise de correlação entre as variáveis morfométricas da copa e as principais informações dendrométricas do fuste (Tabela 5) auxilia no entendimento da importância dos dados da copa para representar as variáveis de fuste e, conseqüentemente, o volume e a biomassa presentes no tronco das árvores.

Tabela 5 - Resultados da correlação entre as variáveis explicativas da morfometria da copa e as variáveis explicativas tradicionalmente empregadas em modelos dendrométricos, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 5 - Results of the correlation between the explanatory variables morphometry crown and the explanatory variables traditionally employed models dendrometric, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Variáveis explicativas empregadas tradicionalmente em modelos dendrométricos					
Variáveis explicativas empregadas na morfometria da copa	DAP	Dmax	Dmin	Hic	Ht
APC	0,73*	0,73*	0,72*	0,03	0,47
Cc	0,48	0,47	0,43	0,01	0,65
Cg	0,33	0,34	0,27	-0,35	0,56
DC	0,71*	0,70*	0,69	0,04	0,53
FC	0,13	0,13	0,20	0,12	-0,17
GE	-0,83*	-0,83*	-0,80*	0,08	-0,02
Hic	0,21	0,20	0,18	-	0,58
Ht	0,48	0,47	0,39	0,58	-
IA	0,58	0,58	0,60	-0,23	0,16
IEV	-0,26	-0,26	-0,22	-0,27	0,09
IS	-0,25	-0,25	-0,20	-0,24	0,13
MC	0,76*	0,75*	0,73*	0,05	0,46
PC	0,38	0,37	0,35	-0,23	0,38
VCop	0,72*	0,71*	0,69	0,05	0,53

Em que: APC, Cc, Cg, DAP, DC, FC, GE, Hic, Ht, IA, IEV, IS, MC, PC e VCop foram citados anteriormente. Dmax = diâmetro médio da maior extremidade do fuste (m), Dmin = diâmetro médio da menor extremidade do fuste e * correlação que explica valores igual ou maiores a 50% das informações.

Os resultados do procedimento de seleção de todos os modelos possíveis foram divididos em duas categorias. O primeiro grupo, representado na Tabela 6 pelas equações de 1 a 8, concebe os resultados da seleção para a estimativa da biomassa seca do fuste. As equações de 9 a 18 representam o segundo grupo, que estima a biomassa verde.

Tabela 6 - Equações alométricas ajustadas para estimativa da biomassa seca e biomassa verde do fuste (toneladas) e estatísticas de precisão para árvores dominantes e codominantes, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 6 - Allometric equations fitted to estimate the dry biomass and green biomass of the bole (tons) and accuracy statistics for dominant and codominant trees, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Nº	Equação ajustada	R ² %	R ² _{aj.} %	S _{yx} (ton)	S _{yx} (%)	Pressp
1	Bsc=-10,7967+0,125589.DAP+0,00000188112.APC ² +8,98374.DB+ i	87,01	86,71	±1,251	23,74	225,715
2	Bsc=-11,8835+0,143744.DAP+9,00693.DB-16,3341(VCop) ⁻¹ + i	85,55	85,22	±1,320	25,17	255,377
3	Bsc=-14,1089+0,131683.DAP+7,91695.DB+0,09971.Ht+ i	87,06	86,76	±1,249	23,82	228,357
4	Bsc=-11,669+0,142277.DAP+9,01489.DB-31,8948.(MC) ⁻¹ + i	85,62	85,29	±1,317	25,10	251,603
5	Bsc=-3,35215+0,00000611781.APC ² +2,92418.DB+0,00360727.Ht ² + i	81,05	80,57	±1,400	27,41	253,323
6	Bsc=-2,70687+0,00000555826.APC ² +0,304461.FC+0,00405378.Ht ² + i	79,35	78,82	±1,456	28,29	270,980
7	Bsc=-8,508+0,00000570871.APC ² +0,034357.Hsolo+0,00407486.Ht ² + i	80,19	79,68	±1,426	27,71	262,789
8	Bsc=-1,83062+0,00000567638.APC ² +0,0039187.Ht ² + i	78,86	78,51	±1,467	28,50	268,962
9	Bvd=-6,93355+0,00000317129APC ² +0,000889017DAP ² +0,218007.Ht+ i	93,24	93,08	±1,496	19,00	372,693
10	Bvd=-7,21209+0,00000312968.APC ² +0,00104766.DAP ² +7,99746.DA+ i	92,05	91,86	±1,622	20,60	382,251
11	Bvd=-11,1972+0,00112925.DAP ² +5,39896.DA+0,167327.Ht+ i	92,80	92,64	±1,545	19,76	379,673
12	Bvd=-7,29007+0,00106939.DAP ² +0,210261.Ht+ i	92,00	91,87	±1,619	20,75	412,075
13	Bvd=-8,0981+0,00122105.DAP ² +8,31836.DA+ i	91,12	90,98	±1,707	21,68	429,903
14	Bvd=0,282158+0,00116885.DAP ² + i	89,69	89,61	±1,837	23,13	475,751
15	Bvd=-5,75185+0,0000116474.APC ² +0,00593658.Ht ² +1,15658.FC+ i	84,38	83,95	±2,321	27,73	655,253
16	Bvd=-12,6105+0,0000122488APC ² +0,0528847Hsolo+0,00554453Ht ² + i	82,76	82,31	±2,428	29,75	752,073
17	Bvd=-2,53575+0,0000130776.APC ² -0,207888.Cc+0,00664606.Ht ² + i	82,60	82,16	±2,416	30,10	782,178
18	Bvd=-1,50343+0,0000130013.APC ² +0,00594433.Ht ² -7,98952.PC+ i	82,51	82,07	±2,423	30,18	779,516

Em que: APC, Bsc, Bvs, Cc, DA, DAP, DB, FC, Hsolo, Ht, MC, PC e VCop foram citados anteriormente. R²% = coeficiente de determinação; R²_{aj.}% = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão residual (± toneladas); S_{yx}% = erro padrão residual em porcentagem; Press_p = soma dos quadrados do erro da predição (ton²); e i = estimativa do erro.

A Figura 3 apresenta os gráficos de erro padrão percentual das melhores equações para a estimativa da biomassa seca (Bsc), considerando a presença e ausência do DAP, enquanto a Figura 4 apresenta os gráficos para a estimativa da biomassa verde (Bvd).

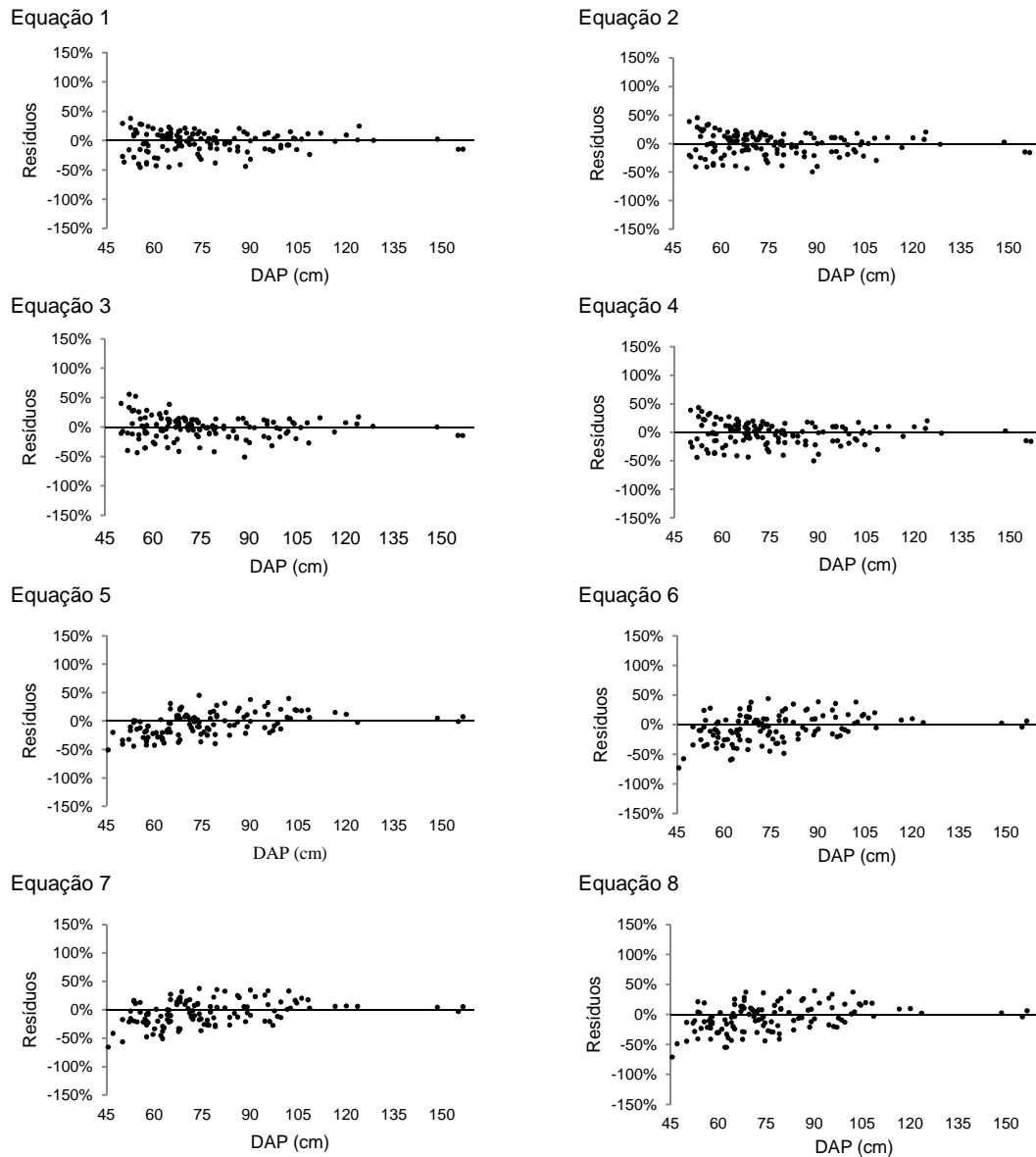
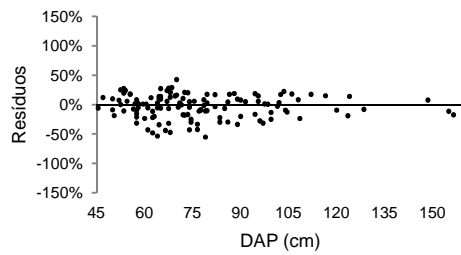


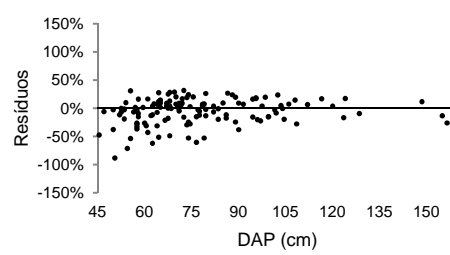
Figura 3 - Distribuição dos resíduos percentuais das melhores equações para estimativa da biomassa seca, com DAP e sem DAP.

Figure 3 - Distribution of percent residue the best equations for estimating dry biomass, with DBH and without DBH.

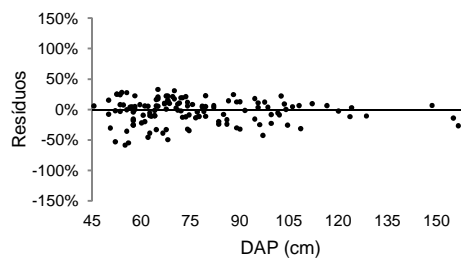
Equação 9



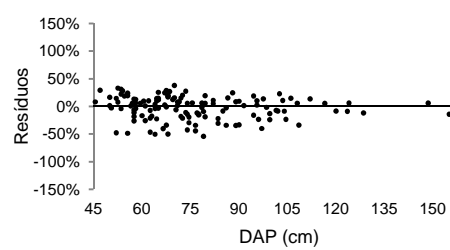
Equação 10



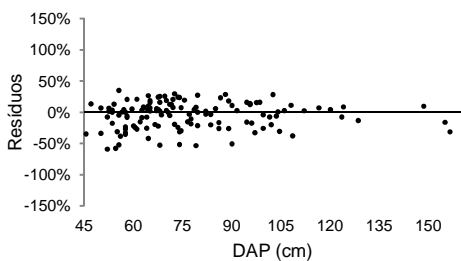
Equação 11



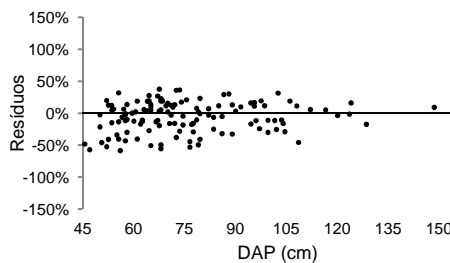
Equação 12



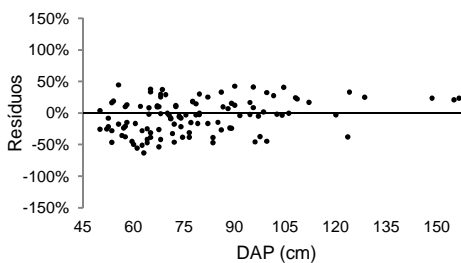
Equação 13



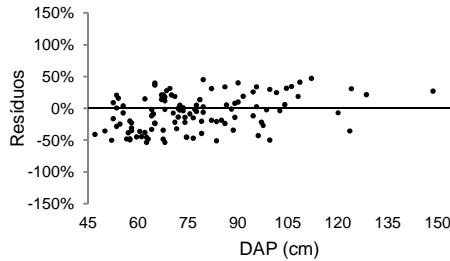
Equação 14



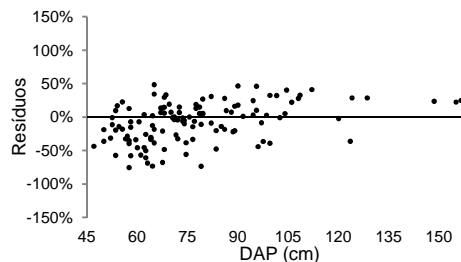
Equação 15



Equação 16



Equação 17



Equação 18

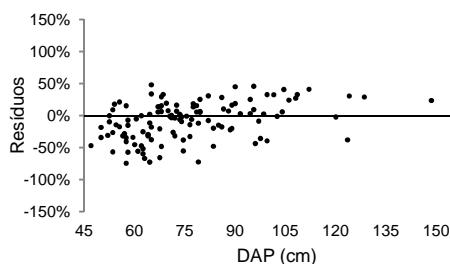


Figura 4 - Distribuição dos resíduos percentuais das melhores equações para estimativa da biomassa verde, com DAP e sem DAP.

Figure 4 - Distribution of percent residue the best equations for estimating green biomass, with DBH and without DBH.

Todas as equações apresentadas na Tabela 6 e as equações originárias da combinação dos subgrupos para o teste de identidade de modelos mostraram valores de Durbin-Watson entre 1,892 e 2,262 ($p = 0,409$ e $0,926$), uma vez que o valor p é maior do que $0,05$, não há nenhuma indicação de autocorrelação serial nos resíduos para os modelos selecionados. O pressuposto da homocedasticidade (F-máximo de Hartley) também foi confirmado nas distintas classes diamétricas da amostra e os testes de aderência da frequência dos resíduos (Kolmogorov-Smirnov) para todas as equações selecionadas não permitem rejeitar a hipótese de uma distribuição normal com 95% de confiança.

A finalidade principal do teste de identidade de modelo é avaliar se os ajustes alométricos, feitos para o conjunto de dados das espécies dos três grupos de densidade da madeira (baixa, média e alta), apresentam características comuns ou se os ajustes deveriam ser realizados individualmente por grupo de densidade ou para subgrupos de duas classes de densidade. A Tabela 7 apresenta os resultados para o teste de identidade dos modelos com a finalidade de estimar a biomassa seca do fuste e a Tabela 8 os resultados para os modelos que estimam a biomassa verde.

Tabela 7 - Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F para as equações de estimativa da biomassa seca, considerando três diferentes combinações de conjunto de espécies classificadas por densidade básica da madeira, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 7 - Result of the test model identity through the F test for the equations for estimating dry biomass and three different combinations of species sets classified by wood density, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Combinações	QM (diferença)	QM (resíduo)	F (calculado)	F 5% (tabelado)	Teste
Modelo 1 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 DAP + \theta_2 APC^2 + \theta_3 DB$					
DBbx/DBmd/DBal	6,42	1,18	5,46	2,02	S
DBbx/DBmd	2,68	1,07	2,52	2,51	S
DBmd/DBal	5,46	1,21	4,52	2,46	S
Modelo 2 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 DAP + \theta_2 DB + \theta_3 VCop^{-1}$					
DBbx/DBmd/DBal	5,02	1,33	3,77	2,02	S
DBbx/DBmd	1,09	1,36	0,80	2,51	NS
DBmd/DBal	5,72	1,19	4,82	2,46	S
Modelo 3 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 DAP + \theta_2 DB + \theta_3 Ht$					
DBbx/DBmd/DBal	1,87	1,50	1,25	2,02	NS
DBbx/DBmd	0,70	1,75	0,40	2,51	NS
DBmd/DBal	1,76	1,25	1,41	2,46	NS
Modelo 4 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 DAP + \theta_2 DB + \theta_3 MC^{-1}$					
DBbx/DBmd/DBal	4,84	1,38	3,51	2,02	S
DBbx/DBmd	1,24	1,45	0,86	2,51	NS
DBmd/DBal	4,39	1,27	3,47	2,46	S
Modelo 5 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 APC^2 + \theta_2 DB + \theta_3 Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	0,69	2,07	0,34	2,03	NS
DBbx/DBmd	1,16	1,84	0,63	2,51	NS
DBmd/DBal	1,11	2,16	0,51	2,47	NS
Modelo 6 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 APC^2 + \theta_2 FC + \theta_3 Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	1,57	2,09	0,75	2,03	NS
DBbx/DBmd	3,24	1,92	1,68	2,52	NS
DBmd/DBal	0,25	2,17	0,12	2,47	NS
Modelo 7 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 APC^2 + \theta_2 Hsolo + \theta_3 Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	0,90	2,04	0,44	2,03	NS
DBbx/DBmd	2,50	1,77	1,41	2,52	NS
DBmd/DBal	0,43	2,13	0,20	2,47	NS
Modelo 8 - $B_{sc} = \theta_0 + \theta_1 APC^2 + \theta_2 Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	1,54	2,12	0,73	2,18	NS
DBbx/DBmd	4,37	1,87	2,34	2,74	NS
DBmd/DBal	0,96	2,22	0,43	2,70	NS

Em que: APC, Bsc, DAP, DB, FC, Hsolo, Ht, MC e VCop foram citados anteriormente. DBbx = conjunto das espécies com madeira de densidade básica baixa ($DB < 0,5$); DBmd = conjunto das espécies com madeira de densidade básica média ($0,5 < DB < 0,7$); DBal = conjunto das espécies com madeira de densidade básica alta ($DB > 0,7$); QM = quadrado médio; $F_{(calculado)}$ = valor do teste de Fischer F calculado para o conjunto de dados de interesse; $F5\%$ (tabelado) = valor tabelado do teste F; S = significativo; NS = não significativo; e θ_{is} = parâmetros a serem estimados.

Tabela 8 - Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F para as equações de estimativa da biomassa verde, considerando três diferentes combinações de conjunto de espécies classificadas por densidade básica da madeira, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Table 8 - Result of the test model identity through the F test for the equations for estimating green biomass and three different combinations of species sets classified by wood density, Antimary State Forest (FEA), Acre, Brazil.

Combinações	QM (diferença)	QM (resíduo)	F (calculado)	F 5% (tabelado)	Teste
Modelo 9 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 + \text{}_{2}DAP^2 + \text{}_{3}Ht$					
DBbx/DBmd/DBal	17,82	1,94	9,18	2,02	S
DBbx/DBmd	42,28	2,17	19,53	2,51	S
DBmd/DBal	8,82	1,82	4,85	2,46	S
Modelo 10 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 + \text{}_{2}DAP^2 + \text{}_{3}DA$					
DBbx/DBmd/DBal	18,24	2,40	7,60	2,02	S
DBbx/DBmd	41,35	2,86	14,48	2,51	S
DBmd/DBal	9,78	2,05	4,78	2,46	S
Modelo 11 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}DAP^2 + \text{}_{2}DA + \text{}_{3}Ht$					
DBbx/DBmd/DBal	23,74	2,33	10,18	2,02	S
DBbx/DBmd	37,36	3,08	12,15	2,51	S
DBmd/DBal	2,23	1,74	1,28	2,46	NS
Modelo 12 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}DAP^2 + \text{}_{2}Ht$					
DBbx/DBmd/DBal	30,28	2,55	11,86	2,17	S
DBbx/DBmd	53,72	3,23	16,65	2,74	S
DBmd/DBal	6,78	1,97	3,44	2,69	S
Modelo 13 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}DAP^2 + \text{}_{2}DA$					
DBbx/DBmd/DBal	39,47	2,97	13,31	2,18	S
DBbx/DBmd	31,29	4,02	7,78	2,74	S
DBmd/DBal	3,15	2,30	1,37	2,69	NS
Modelo 14 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}.DAP^2$					
DBbx/DBmd/DBal	76,24	3,12	24,47	2,45	S
DBbx/DBmd	131,43	4,13	31,82	3,14	S
DBmd/DBal	14,37	2,51	5,72	3,08	S
Modelo 15 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 + \text{}_{2}Ht^2 + \text{}_{3}FC$					
DBbx/DBmd/DBal	18,00	4,44	4,06	2,03	S
DBbx/DBmd	57,32	4,19	13,70	2,54	S
DBmd/DBal	10,44	4,13	2,53	2,48	S
Modelo 16 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 + \text{}_{2}Hsolo + \text{}_{3}Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	4,44	5,33	0,83	2,03	NS
DBbx/DBmd	22,26	4,08	5,46	2,53	S
DBmd/DBal	2,54	5,21	0,49	2,48	NS
Modelo 17 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 - \text{}_{2}Cc + \text{}_{3}Ht^2$					
DBbx/DBmd/DBal	4,11	5,13	0,80	2,03	NS
DBbx/DBmd	28,49	4,31	6,61	2,52	S
DBmd/DBal	12,09	5,00	2,42	2,47	NS
Modelo 18 - $Bvd = \text{}_{0+} \text{}_{1}APC^2 + \text{}_{2}Ht^2 + \text{}_{3}PC$					
DBbx/DBmd/DBal	4,10	5,16	0,79	2,03	NS
DBbx/DBmd	28,50	4,30	6,63	2,52	S
DBmd/DBal	12,01	5,04	2,38	2,47	NS

Em que: APC, Bvd, Cc, DA, DAP, Dbal, DBbx, DBmd, F_(calculado), F5%_(tabelado), FC, Hsolo, Ht, NS, PC, QM, S e is foram citados anteriormente.

DISCUSSÃO

Para Crow e Schlaegel (1988), Baker *et al.* (2004) e Scolforo *et al.* (2008), as equações alométricas devem buscar reduzir as possíveis fontes de variação, evitando a generalização de modelos que contemplaram base de dados específicas de estudos de caso. Assim, considerar equações alométricas geradas a partir de uma estrutura florestal distinta não reflete a realidade de campo do manejo florestal. Dessa forma, modelos devem ser ajustados refletindo a realidade de cada região e interesse.

Por se tratar de um estudo focado na biomassa do fuste de árvores destinadas à indústria madeireira e cortadas em manejo florestal, a composição amostral difere dos estudos de estimativa de biomassa total das árvores e para a composição florestal completa, a exemplo de Higuchi *et al.* (1998), Silva (2007) e Nogueira *et al.* (2007).

A maioria dos estudos para a estimativa da biomassa das florestas nativas apresenta uma amostra que se inicia nas menores classes diamétricas (DAP = 5 cm) e, geralmente, avança em menos de 10% dos indivíduos amostrados com DAP = 50 cm. Neste estudo, a amostragem começa com árvores de DAP = 45 cm chegando a contemplar as maiores árvores da população com DAP de 164 cm.

Essa mudança na composição amostral interfere diretamente nas estimativas de biomassa, principalmente, em decorrência da mudança da estrutura diamétrica, espécies e densidade.

A diferença estatística significativa da densidade básica (DB), apontada entre as amostras da primeira e da última tora, corrobora com os resultados obtidos por Scolforo *et al.* (2004), Nogueira *et al.* (2005), Nogueira *et al.* (2007) e Silveira *et al.* (2013). Assim, ao empregar a densidade básica para a estimativa de biomassa de um grupo de espécies, deve-se fazer a opção pela coleta de uma amostra composta ao longo do fuste, visto que o uso de amostras tomadas a partir de uma única posição no fuste pode acarretar em oscilações médias de 7,28% na densidade básica da madeira.

O mesmo comportamento não foi observado quando se usa a densidade aparente. Não há diferença significativa entre a base e o topo do fuste.

O teor médio de umidade da madeira do fuste foi cerca de 8% inferior aos resultados obtidos por Fearnside (1997), Higuchi *et al.* (1998) e Nogueira *et al.*

(2007), os quais obtiveram teor de umidade do fuste em torno de 41%. Essa diferença deve-se à composição amostral já explicada anteriormente, ou seja, o referido estudo contém uma maior proporção de espécies com densidade básica da madeira entre média e alta, cujo teor de umidade é menor.

A análise de influência auxilia no entendimento da composição dos modelos lineares e na tomada de decisão sobre a exclusão ou não de uma observação atípica. Quando se ajustaram modelos formados exclusivamente com variável explicativa de copa, mais de 14% das observações foram influentes simultaneamente em três estatísticas da análise. Essa atipicidade está vinculada à existência de árvores com copas quebradas.

Os dados foram melhor modelados quando se incorporaram num mesmo modelo variáveis morfológicas de copa e as tradicionalmente utilizadas (DAP, Ht, DB e DA), mesmo assim, cerca de 5% das observações foram influentes.

Apesar das árvores com copa quebrada serem facilmente identificadas na interpretação da nuvem de pontos do LIDAR, os modelos não conseguem representá-las, sendo elas excluídas como observações atípicas.

Em uma estratégia de manejo florestal, as árvores de copas quebradas devem ser priorizadas para exploração em decorrência de sua menor capacidade reprodutiva, maior rendimento e por provocar o impacto mínimo de clareira, devido a sua copa reduzida. Porém, deverão ser mensuradas em campo, pois os modelos são incapazes de gerar estimativas confiáveis.

As variáveis APC, Mc e VCop são as informações que sofrem maior influência da existência de copas quebradas. A maior variação pode ser notada no volume de copa (VCop), pois os resultados de perda parcial de copa são fortemente refletidos no resultado tridimensional do volume.

A Tabela 4 relaciona os resultados da correlação linear entre todas as variáveis independentes e as duas dependentes modeladas. As variáveis DAP, MC, APC, VCop e DC apresentam grande correlação linear com as biomassas verde (Bvd) e seca (Bsc). Essa informação é importante quando se pretende ajustar modelos lineares ou avaliar a capacidade explicativa de determinada informação. Isso fica evidenciado, principalmente, para as quatro variáveis morfológicas da copa (MC, VCop, APC e DC), que apresentam forte poder explicativo com correlação acima de 0,7.

As variáveis MC e VCop obtidas exclusivamente pelo processamento da nuvem de pontos do LIDAR explicam diretamente mais de 50% dos dados para se estimar a biomassa estocada no fuste das árvores dominantes e codominantes, além de corroborarem com o entendimento de Schneider e Schneider (2008) que mencionam a importância de compreender o espaço horizontal da floresta, ou seja, os indivíduos com maior copa apresentam a máxima capacidade de estocar biomassa e representam o potencial do sítio florestal.

Ao analisar a correlação entre os dados do fuste (DAP, Dmax, Dmin, Hic e Ht) e as informações morfométricas da copa, pode-se compreender melhor a importância de cada variável explicativa oriunda da copa (Tabela 5). O manto da copa (MC) e a área de projeção da copa (APC), além de conseguir explicar bem o DAP e o Dmax, também apresentam forte correlação com o Dmin. O diâmetro da ponta fina do fuste, ou Dmin, é uma informação relevante para o rendimento florestal na indústria e de significativa importância para o entendimento da biomassa estocada no fuste. Portanto, árvores com grande estrutura de copa apresentam maiores DAP e Dmin, e conseqüentemente, estocam maior biomassa.

As árvores mais altas não foram, necessariamente, aquelas que apresentaram maiores diâmetros (DAP, Dmax e Dmin), isso mostra a baixa relação hipsométrica da população estudada. Assim, equações alométricas de simples entrada com a variável DAP podem não representar adequadamente as variações florestais na Amazônia, conforme o fortalecem o entendimento de Crow e Schlaegel (1988), Santos (1996), Fearnside (1997), Clark e Clark (2000), Fearnside (2007) e Feldpausch *et al.* (2012). Dessa forma, a inclusão da variável explicativa Ht (altura total) ganha importância, estando presente em 66% das equações selecionadas para estimativa das biomassas verde e seca.

A variável altura total (Ht) da árvore é descartada na grande maioria dos modelos de regressão, em virtude da dificuldade de obtenção em campo. Segundo Overman *et al.* (1994), Brown *et al.* (1995), Higuchi *et al.* (1998), Santos *et al.* (2001) e Silva (2007) a inclusão da altura das árvores nos modelos alométricos pouco contribui para a melhoria dos resultados e está sujeita à imprecisão devido às dificuldades de obtenção em campo.

No entanto, essa variável ganha importância e praticidade de coleta quando se emprega o LIDAR aerotransportado, pois os problemas de coleta e imprecisão

para a variável altura total (Ht) é uma etapa tecnologicamente superada e sempre que possível deve ser incorporada nos modelos alométricos por se tratar da variável mais facilmente obtida pelo processamento da nuvem de pontos. Contudo, antes de se obter as alturas das árvores pela nuvem de pontos do laser, deve-se realizar a normalização das alturas e excluir o conjunto de pontos flutuante acima do dossel da floresta, os quais representam revoadas de aves modeladas durante o perfilamento pelo LIDAR aerotransportado. Negligenciar essa etapa do processamento pode acarretar na superestimativa da altura total (Ht).

Outro aspecto importante, que fortalece a inclusão da variável altura já descrita por Brown (2002), está no resultado em que as equações que consideram somente diâmetro e representam extensas áreas florestais com variações de tipologia tendem a não refletir adequadamente a verdadeira biomassa das árvores em uma dada região. Além disso, a altura das árvores sempre foi um conceito de qualidade do ecossistema florestal, o qual é representado pela altura das árvores dominantes. Essa variável florestal está vinculada à capacidade do sistema em estocar biomassa (Cassol 1982; Stansfield *et al.* 1992; Scolforo 1998; Figueiredo 2005).

Para a estimativa da biomassa seca do fuste (Bsc) foram selecionadas oito equações (Tabela 6), em que os melhores resultados foram alcançados pelas equações 1, 3, 4 e 2. Nos quatro melhores modelos sempre consideraram a inclusão das variáveis DAP e DB, sendo que a equação (1) resultou em melhores estatísticas de precisão e menor valor de validação por $Press_p$. Nas equações 2 e 4 foram incorporadas as variáveis morfométricas de copa: área de projeção de copa (APC), volume de copa (VCop) e manto de copa (MC), ou seja, as três variáveis explicativas da copa com maior correlação com a biomassa do fuste.

A equação 3 representa os modelos tradicionalmente empregados para estimativa da biomassa seca, com a inclusão das variáveis DAP, DB e Ht, cujos resultados estatísticos são similares às equações com variáveis de copa.

Equações de simples entrada para Bsc não foram selecionadas pela rotina estatística, por não conseguir representar adequadamente as maiores variações das informações dendrométricas das árvores amostradas.

Quando se pretender excluir o DAP como variável explicativa e empregar apenas as variáveis da morfometria da copa, obtidas com o LIDAR, associadas ou

não à variável densidade da madeira, pode-se utilizar as equações 5, 6, 7 e 8, porém, com resultados de precisão inferiores quando comparadas às equações com DAP. A grande vantagem de se utilizar um modelo sem variáveis explicativas que sejam tomadas em campo (DAP e densidade) é que, a partir do momento em que se tenha uma equação ajustada e validada para determinado local pode-se fazer estimativas para árvores dominantes e codominantes em escritório, por meio do processamento da nuvem de pontos do LIDAR aerotransportado, otimizando os trabalhos do planejamento operacional anual em áreas de manejo florestal.

A distribuição dos resíduos percentuais (Figura 3) é semelhante para as quatro primeiras equações, nas quais as variáveis DAP e DB se fazem presentes. Para o gráfico dessas quatro equações, observa-se uma maior heterogeneidade dos resíduos nas menores classes, porém isso não foi impeditivo para o cumprimento dos pressupostos da regressão, sendo que a distribuição dos erros não apresentou tendências e convergiu para zero.

Quando se retira o DAP como variável explicativa, conforme representado pelas equações 5, 6, 7 e 8 (Figura 3), fica evidenciada uma tendência de superestimativa da biomassa do fuste entre as árvores com diâmetro de 45 a 60 cm. A dificuldade do modelo em representar as menores classes diamétricas deve-se ao fato de que nessa faixa de diâmetro ocorre um maior número de espécies de interesse comercial no manejo florestal madeireiro. Quando se eleva a faixa diamétrica, o número de espécies reduz e, conseqüentemente, também diminuem as fontes de variação.

Nas equações ajustadas para estimar a biomassa verde (equações de 9 a 18) os resultados estatísticos de precisão foram sempre melhores quando comparados com as equações de biomassa seca, devido à menor amplitude de valores de densidade aparente (DA) das espécies nos três distintos grupos de densidade da madeira.

As equações 9 e 11 apresentaram as melhores estatísticas de precisão e menores valores de validação pelo resultado de $Press_p$. A distribuição dos resíduos percentuais para as duas equações (Figura 4) apresenta semelhanças com destaque para a pequena dispersão dos erros percentuais e sem tendências de super ou subestimativas.

Quando se pretende estimar a biomassa verde, os modelos lineares tradicionalmente empregados com as variáveis explicativas (DAP, Ht e DA) apresentam boa capacidade preditora, e a incorporação de variáveis morfométricas da copa pouco contribui para a melhoria da precisão. É possível até mesmo ajustar modelos de simples entrada (DAP), corroborando assim com os resultados alcançados por Higuchi (1998). Porém, quando se faz a opção apenas pelo DAP como variável explicativa, fica evidente uma maior dispersão dos resíduos em todas as faixas diamétricas, resultados também alcançados por Chave *et al.* 2005 e Feldpausch *et al.* (2012).

As equações para biomassa verde 15, 16, 17 e 18 as quais utilizam apenas variáveis obtidas do processamento da nuvem de pontos do LIDAR, apresentaram resultados estatísticos de precisão inferiores aos modelos que contemplam o DAP. Isso já havia ocorrido com as equações para biomassa seca, em que a inclusão da variável explicativa DAP diminui a dispersão dos resíduos para menores classes de diâmetro.

As variáveis explicativas mais importantes para a estimativa da biomassa verde foram DAP e APC, associadas ou não com as variáveis Ht, DA, FC, Hsolo, Cc e PC, as quais foram selecionadas pela rotina estatística de todos os modelos possíveis (Ryan 2011).

O teste de identidade de modelos busca avaliar a conveniência de se ajustar modelos que considerem um único grupo de dados com espécies das três categorias de densidade básica da madeira (baixa, média e alta) ou a estruturação de subgrupos Graybill (1976).

As equações 1, 2 e 4 para estimativa da biomassa seca (Tabela 7), com a variável explicativa DAP, apresentam diferenças significativas apontadas pelo teste F. Assim, se obtém melhores resultados quando os ajustes de modelos são realizados separadamente para cada grupo de densidade da madeira.

A equação 3 é a única que considera o DAP como variável explicativa e que permite a formação de uma única base de dados com todas as densidades. Essa equação é tradicionalmente utilizada e considera a inclusão das variáveis explicativas DAP, DA e Ht.

As equações 6, 7 e 8, que apresentaram, exclusivamente, variáveis obtidas com o LIDAR aerotransportado, com destaque para as variáveis APC, Ht, FC e

Hsolo, podem ser ajustadas para o conjunto de dados com distintas densidades básicas da madeira. Isso permite uma maior praticidade no ajuste e no uso das equações da estimativa da biomassa das árvores dominantes e codominantes das unidades de produção do manejo florestal.

As equações para biomassa seca que foram desenvolvidas com variáveis de copa (APC e FC), associadas à Ht ou sítio (Hsolo), conseguiram representar melhor o conjunto de informações da população florestal amostrada, independentemente da densidade da madeira. Caso se faça a opção de não utilizar modelos que considerem as variáveis de copa, deve-se ajustar modelos separadamente para cada grupo de densidade da madeira, ou incluir a variável densidade básica (DB) para que se possa ajustar um único modelo.

O teste de identidade de modelos para equações da biomassa verde (Tabela 8) também apresentou resultados similares aos obtidos com as equações de biomassa seca. As equações que incluem o DAP (equações de 9 a 14) apresentam resultado do teste F significativo e o ajuste de equações não deve ser reduzido para uma única equação que abranja todos os grupos de densidade básica da madeira.

Os únicos modelos para Bvd (equações 16, 17 e 18) que contemplam os três grupos de densidade são aqueles que consideram exclusivamente as variáveis de morfometria da copa, a exemplo dos resultados já obtidos nos testes de identidade dos modelos para biomassa seca.

CONCLUSÃO

Quando se escolher a densidade da madeira como variável explicativa, deve-se fazer a opção de coleta: a) para densidade básica obter de uma amostra composta ao longo do fuste; e b) para densidade aparente (DA) não há necessidade de amostras compostas.

Na estimativa de biomassa seca os melhores resultados de precisão e distribuição dos resíduos sempre foram alcançados quando se utilizaram conjuntamente as variáveis morfométricas de copa e as tradicionalmente empregadas (DAP, Ht e DB). Quanto à estimativa da biomassa verde, as variáveis morfométricas de copa pouco contribuíram para a melhoria da precisão.

As árvores com copas quebradas (cerca de 14%) foram apontadas pela análise de influência como *outliers* e não são modeladas pelas equações que empregam variáveis de morfometria da copa.

As variáveis com maior correlação linear com as biomassas verde e seca do fuste foram: diâmetro à altura do peito (DAP), densidade básica da madeira (DB), manto de copa (MC), área de projeção de copa (APC), volume de copa (VCop) e diâmetro de copa (DC).

O manto de copa (MC) e a área de projeção da copa (APC) apresentam forte correlação com o diâmetro da ponta fina do fuste (Dmin) e constituem importantes variáveis explicativas para o rendimento florestal e a biomassa estocada no fuste.

As equações para a estimativa das biomassas seca (Bsc) e verde (Bvd) que apresentam, unicamente, variáveis de morfometria copa e/ou sítio (Hsolo), proporcionam estatísticas de precisão inferiores quando comparadas com os modelos com DAP. Contudo, apresentam boa capacidade para estimar a biomassa de árvores dominantes e codominantes, independente do grupo de densidade básica da madeira, e podem ser empregadas exclusivamente de dados obtidos no processamento da nuvem de pontos do LIDAR aerotransportado.

SÍNTESE

Os estudos desenvolvidos nos três capítulos da tese demonstram a viabilidade do perfilamento de florestas tropicais com o LIDAR aerotransportado, com o objetivo de construir modelos biométricos para o planejamento da exploração de manejos florestais, que empregam técnicas de precisão.

Quando se emprega o LIDAR aerotransportado, novas variáveis são incorporadas com destaque para aquelas advindas da morfometria da copa das árvores dominantes e codominantes. Em decorrência das características da tipologia florestal, as informações dendrométricas tradicionalmente empregadas, como o DAP e G (área basal) ficam prejudicadas, bem como a mensuração de toda vegetação de sub-bosque.

As variáveis morfométricas da copa e ambientais obtidas pelo processamento da nuvem de pontos do LIDAR, mais importantes para o ajuste dos modelos de estimativa de biomassa, volume e clareiras foram: área de projeção da copa (APC), grau de esbeltez (GE), índice de abrangência (IA), manto da copa (MC), volume da copa (VCop), altura total (Ht), diâmetro médio da copa (DC), conjuntamente, com a elevação do terreno (Hsolo). O DAP continua sendo uma importante variável independente, quando se pretende estimar o volume e biomassa do fuste.

O manto da copa (MC) e a área de projeção da copa (APC) apresentam forte correlação com o diâmetro da ponta fina do fuste (Dmin) e constituem importantes variáveis explicativas para o rendimento florestal e para a biomassa estocada no fuste.

As árvores com copas danificadas ou quebradas podem ser identificadas pelo processamento do LIDAR e apontadas como *outliers* pela análise de influência. Essas árvores com copas danificadas ganham importância no planejamento florestal e na estratégia de manejo das florestas tropicais.

Com os resultados alcançados e metodologias desenvolvidas e adaptadas na tese, foi possível gerar conhecimento para progredir no planejamento florestal do manejo de precisão, nas etapas de inventário florestal, microzoneamento, biometria florestal, seleção de árvores para corte, planejamento da infraestrutura e procedimentos de exploração florestal em campo.

No inventário florestal censitário, o perfilamento permite localizar previamente durante o processamento da nuvem de pontos, as árvores dominantes e

codominantes (geralmente árvores acima de 40 cm) no estrato superior do dossel da floresta e atribuir uma coordenada geográfica com precisão centimétrica. Assim, a equipe de inventário florestal sai para campo com a posição geográfica de pelo menos 90% dos indivíduos de interesse. Conseqüentemente, o processamento de dados direciona um maior esforço para a localização de árvores na nuvem de pontos e na coleta das variáveis morfométricas de copa. Ressalta-se que significativa parte do procedimento é feita por algoritmos de softwares de processamento de dados do LIDAR de forma automatizada.

O microzoneamento de campo será integralmente substituído pelo processamento dos pontos de laser que atingirão o solo, de forma a modelar o terreno em três dimensões com precisão de centímetros. A hidrografia de qualquer ordem, canais de drenagem efêmeros, acidentes topográficos de todas as escalas serão mapeados e transferidos para os receptores GPS da equipe de inventário, com intuito de auxiliar os trabalhos de campo, melhorando a segurança e o rendimento das atividades de inventário.

As estimativas de volume e biomassa serão realizadas por meio de equações ajustadas a partir de variáveis explicativas da morfometria da copa. As árvores com a copa quebrada terão seus diâmetros (DAP) mensurados em campo e as alturas medidas pelo LIDAR. Assim, para a segunda unidade de produção anual (UPA) a ser trabalhada, o planejamento florestal terá a contribuição de equações ajustadas pela morfometria da copa. As equações com variáveis explicativas da copa serão utilizadas para árvores dominantes e codominantes sem deformação de copa. Para as árvores de copa quebrada, deformada ou sem copa serão utilizadas as equações de simples ou dupla entrada (DAP e altura).

Na seleção de árvores para o primeiro ciclo será incorporado um novo critério além dos já estabelecidos pelos instrumentos normativos. Será priorizada a exploração de árvores com copas quebradas, com grande dimensão do fuste e aptas para corte (sem ocos ou tortusidades), em função da perda parcial de seu papel ecológico de reprodução, menor impacto de exploração e maior rendimento madeireiro. Posteriormente, os demais critérios serão adotados.

Seguindo o preceito de menor dano e maior volume, as equações de estimativa de impacto de clareiras fornecerão para o planejamento, a partir da

segunda UPA, um instrumento a mais para o engenheiro florestal, o qual permite a seleção de árvores que propicie um menor prejuízo à floresta remanescente.

O projeto de construção de estradas, pátios, bueiros e pontes será feito no espaço 3D no processamento da nuvem de pontos do LIDAR. As infraestruturas serão planejadas seguindo as técnicas preconizadas pelo Modeflora (fase I), porém em outro ambiente de processamento de realidade virtual na tela do computador. Com isso, a expectativa é que o nível de acerto do planejamento seja melhorado em todas as infraestruturas planejadas. O projeto continuará a ser apresentado da forma tradicional, porém, associado a um conjunto de arquivos de nuvem de pontos já processado que representará a realidade virtual da unidade de produção.

As atividades de campo seguirão os mesmos procedimentos metodológicos do Modeflora (fase I), porém informações de relevo e estrutura de copa das árvores de interesse poderão ser associadas a receptores GPS em que será possível a construção de um ambiente de realidade aumentada (RA), de maneira a auxiliar na alocação da infraestrutura, na localização de árvores e na decisão da direção de queda.

Os procedimentos de manejo de precisão em florestas tropicais ainda apresentam um vasto campo a ser melhorado com a incorporação de técnicas de biometria florestal e escaneamento 3D em larga escala. Assim, os resultados alcançados e os métodos utilizados e adaptados nos três capítulos desta tese não pretendem esgotar o assunto, e sim, continuar um ciclo de avanços iniciados com a silvicultura e manejo de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acre. 2000. Governo do estado do Acre. Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre. *Zoneamento ecológico-econômico: recursos naturais e meio ambiente*. SECTMA, Rio Branco, Acre, 116p.
- Almeida, S.S. 1989. *Clareiras naturais na Amazônia Central: abundância, distribuição, estrutura e aspectos da colonização vegetal*. Dissertação de mestrado, Inpa/Ufam, Manaus, Amazonas. 125p.
- Amaral, P.; Veríssimo, A.; Barreto, P.; Vidal, E. 1998. *Floresta para sempre: um Manual para Produção de Madeira na Amazônia*. Imazon, Belém, Pará, 130p.
- Andersen, H.E.; Foster, J.R.; Reutebuch, S.E. 2003. *Estimating forest structure parameters within Fort Lewis Military Reservation using airborne laser scanner (LIDAR) data*. In: Proceedings, 2nd International Precision Forestry Symposium. Seattle, Washington, University of Washington, College of Forest Resources, 45-53p.
- Andersen, H.E.; Strunk, J.; Temesgen, H.; Atwood, D.; Winterberger, K. 2011. Using multi-level remote sensing and ground data to estimate forest biomass resources in remote regions: A case study in the boreal forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(6): 596–611.
- Applied Imagery. 2010. *Quick Terrain Modeler – LIDAR Exploitation Software, Version 7. User's Manual*, Applied Imagery, Silver Springs, Maryland, EUA, 232p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2003. *NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, 6p.
- Baker, T.R.; Phillips, O.L.; Malhi, Y.; Almeida, S.; Arroyo, L.; Fiore, A.; Erwin, T.; Killen, T.J.; Laurance, S.G.; Laurance, W.F. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, 10: 545-562.
- Barros, P.L.C; Silva Júnior, A.T. 2009. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, oeste do estado do Pará, Amazônia Oriental. *Ciências Agrárias*, Belém, Pará, 51: 115 -126.

- Barton, A.M.; Fetcher, N.; Redhead, S. 1989. The relationship between treefall gap size and light flux in a Neotropical rain forest in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 5: 437-439.
- Bottai, L.; Arcidiaco, L.; Chiesi, M.; Maselli, F. 2013. Application of a single-tree identification algorithm to LiDAR data for the simulation of stem volume current annual increment. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 073699-073699.
- Brokaw, N.V.L. 1982. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. *Biotropica*, 14: 158-160.
- Brown, I.F.; Martinelli, L.A.; Thomas, W.W.; Moreira, M.Z.; Ferreira, C.A.C.; Victoria, R.A. 1995. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: an example from Rondônia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 75: 175–189.
- Brown, S. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116: 363-372.
- Burger, H. 1939. Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen*, 21: 147-176.
- Cassol, C.I.A. 1982. *Relações entre características do solo, crescimento e produtividade em povoamento implantado de Araucaria angustifolia (Bert.) O.Ktze., em Passo Fundo – RS*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 84p.
- Chatterjee, S.; Hadi, A.S. 1986. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. *Statistical Science*, 3(1): 379-416.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown, S.; Cairns, M.A.; Chambers, J.Q.; Eamus, D.; *et al.* 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1): 87-99.
- Clark, D.B.; Clark, D.A. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*, 137(1-3): 185-198.
- Coops, N.C. 2007. Estimating canopy structure of Douglas-Fir forest stands from discrete-return LiDAR. *Trees - Structure and Function*, New York, 21: 295-310.

- Crow, T.R.; Schlaegel, B.E. 1988. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *Northern Journal of Applied Forestry*, United States, 5(1): 15–22.
- Cunha, T.A. 2009. *Modelagem do incremento de árvores individuais de Cedrela odorata L. na floresta amazônica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 88p.
- D’Oliveira, M.V.N.; Braz, E.M. 2006. Estudo da dinâmica da floresta manejada no projeto de manejo florestal comunitário do PC Peixoto na Amazônia Ocidental. *Acta Amazônica*, 36(2): 177-182.
- D’Oliveira, M.V.N.; Reutebuch, S. E.; Mcgaughey, R. J.; Andersen, H.E. 2012. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 124: 479-491.
- Dawkins, H. C. 1963. Crown diameters: their relationship to bole diameter in tropical trees. *Commonw. Forest Review*, 42: 318-333.
- Denslow, J.S.; Hartshorn, G.S. 1994. Tree-fall gap environments and forest dynamic process. In: MCdade, L.; Bawa, K.S.; Hespeneide, H.A.; Hartshorn, G.S. *La Selva- Ecology and Natural History of a Neotropical Rain Forest*. The University of Chicago Press, Chicago. 01: 120-127p.
- Durlo, M.A.; Denardi, L. 1998. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul, *Ciência florestal*, Santa Maria, 8: 55-66.
- Fearnside, P.M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 90(1-3): 59-87.
- Fearnside, P.M. 2007. Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais. *Brazilian Journal of Ecology*, 10: 83-100.
- Feitosa, A.A.N.; Roweder, C.; Castro, M.F.; Lima, Q.S.; Lima, V.M. 2012. *Procedimentos metodológicos aplicados na construção de mapas dinâmicos no cartão MicroSd para uso no GPS: emprego da técnica pelo Instituto de Meio Ambiente do Acre em vistorias técnicas de planos de manejo florestal sustentável*. VII CONNEPI, Palmas, Tocantins, (<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/4962/1912>). Acesso em 14/01/2014.

- Feldpausch, T.R.; Lloyd, J.; Lewis, S.L.; Brienen, R.J.W.; Gloor, E.; Mendoza, A.M.; *et al.* 2012. Tree height integrated into pan-tropical forest biomass estimates. *Biogeosciences Discussions*, 9(3): 2567-2622.
- Figueiredo, E.O. 2005. *Avaliação de povoamentos de teca (Tectona grandis L.f.) na microrregião do Baixo Rio Acre*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 301p.
- Figueiredo, E.O.; Braz, E.M.; d'Oliveira, M.V.N. 2007. *Manejo de Precisão em Florestas Tropicais: Modelo Digital de Exploração Florestal*. Rio Branco: Embrapa Acre, 2007, 183p.
- Figueiredo, E.O.; Cunha, R.M. 2007. *Levantamento das Árvores com Coordenadas Apropriadas com GPS de Alta Sensibilidade*. In: Figueiredo, E.O.; Braz, E.M.; d'Oliveira, M.V.N. *Manejo de Precisão em Florestas Tropicais: Modelo Digital de Exploração Florestal*. Rio Branco, Acre: Embrapa Acre, 100-120p.
- Figueiredo, E.O.; Halk, T.M.; Papa, D.M.; Cunha, R.M.; Cassol, H.L.G. 2010. *Procedimentos metodológicos utilizados na compilação de dados do Modelflora para a construção de mapas dinâmicos no cartão MicroSD para uso no GPS*. Circular Técnica 52, Rio Branco, Acre: EMBRAPA-CPAF/AC, 17p.
- Figueiredo, E.O.; Lima, Q.S. 2008. *Coeficientes técnicos para o inventário e manejo florestal com emprego do Modelo Digital de Exploração Florestal (Modelflora)*. Comunicado Técnico 169, Rio Branco, Acre: Embrapa Acre, 19p.
- Freitas, L.J.M.; Souza, A.L.; Leite, H.G.; Silva, M.L. 2005. Análise técnica e estimativas de custos de inventários de prospecção em uma floresta estacional semidecidual submontana. *Revista Árvore*, 29(1): 65 – 75.
- Garmin. 2007. *GPSMAP 76 Cx Sirf Star*. (<http://www.garmin.com/products/gpsmap76cx/#>). Acesso em 05/01/2007.
- Gonçalves, S.L.; González, F.E.; Diéguez, A.U. 2011. Assessing the attributes of high-density Eucalyptus globulus stands using airborne laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24): 9821-9841.
- Graybill, J. 1976. *Theory and application of the linear model*. Belmont: Duxbury, 704p.

- Hasenauer, H.; Moser, M.; Eckmüllner, O. 1995. Ein Programm zur Modellierung von Wachstumsreaktionen. *Allgemeine Forstzeitung*, 4: 216-218.
- Helveta, 2014. *Helveta - Transparency through Traceability Software* (<http://www.helveta.com/>). Acesso em 14/01/2014.
- Higuchi, N.; Santos, J. dos; Ribeiro, R. J.; Minette, L.; Biot, Y. 1998. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, 28(2): 153 – 166.
- Holmgren, J.; Nilsson, M.; Olsson, H. 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning. *Forest Science*, 49(3): 419-428.
- Hubbell, S.P.; Foster, R.B.; O'Brien, S.T.; Harms, K.E.; Condit, R.; Wechsler, B.; Wright, S.J.; Loo de Lao, S. 1999. Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, 283: 554-557.
- Hudak, A.T.; Crookston, N.L.; Evans, J. S.; Falkowski, M.K.; Smith, A.M.S.; Gessler, P.E.; Morgan, P. 2012. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return lidar and multispectral data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2): 126–138.
- Ibama. 2006. *Instrução normativa n° 5, de 11 de março de 2006. Dispõe sobre os procedimentos técnicos para elaboração, apresentação e execução e avaliação dos planos de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal.* (www.ibama.gov.br). Acesso em: 14/01/2014.
- Ioki, K.; Imanishi, J.; Sasaki, T.; Morimoto, Y.; Kitada, K. 2010. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 6(1): 29-36.
- Jardim, F.C.S.; Serrão, D.R.; Nemer, T.C. 2007. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras, sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas, em Moju-PA. *Acta Amazonica*, 37(1): 37-48.
- Kaula, W.M.; Schubert, G.; Lingenfelter, R.E.; Sjogren, W.L.; Wollenhaupt, W.R. 1974. Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure, *Geochim Cosmochim*, 3(5): 3049-3058.

- Lim, K.S.; Treitz, P.M. 2004. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 558-570.
- Lima, R.A.F. 2005. Gap size measurement: the proposal of a new field method. *Forest Ecology and Management*, 214:413-419.
- Lingnau, C.; Silva, M.N.; Santos, D.S.; Machado, A.; Lima, J.G.S. 2008. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. *Revista Ambiência*, Guarapuava, Paraná, 4: 85-96.
- Lopes, J.C.A. 1993. *Demografia e flutuações temporais da regeneração natural após uma exploração florestal: Flona do Tapajós-Pará*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 133p.
- Martins, S.V. 1999. *Aspectos da dinâmica de clareiras em uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 215 p.
- Mattos, P.P.; Braz, E.M. 2007. Reunião técnica: Manejo Florestal e Silvicultura de Precisão no Norte do Estado do Mato Grosso, Rondônia e Acre. Curitiba, *Anais*. Colombo, Paraná: Embrapa Florestas, ([http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=autoria: %22REUNI%C3%83O% 20T% C3% 89CNICA %20DO%20 PROJETO:%20 Manejo%20Florestal%20 e%20 Silvicultura%20de%20Precis%C3%A3o%20no%20Norte%20do%20Estado%20do% 20Mato%20Grosso,%20Rond%C3%B4nia%20e%20Acre,%202007,%20Curiti ba.%22](http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22REUNI%C3%83O%20T%C3%89CNICA%20DO%20PROJETO:%20Manejo%20Florestal%20e%20Silvicultura%20de%20Precis%C3%A3o%20no%20Norte%20do%20Estado%20do%20Mato%20Grosso,%20Rond%C3%B4nia%20e%20Acre,%202007,%20Curitiba.%22)). Acesso em 14/01/2014.
- Næsset, E.; Gobakken, T. 2008. Estimation of above and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3079-3090.
- Nogueira, E.M.; Fearnside, P.M.; Nelson, B.W.; Barbosa, R.I.; Keizer, E.W.H. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256: 1853-1867.

- Nogueira, E.M.; Fearnside, P.M.; Nelson, B.W.; França, M.B. 2007. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 248:119-135.
- Nogueira, E.M.; Nelson, B.W.; Fearnside, P.M. 2005. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 208: 261-286.
- Oliver, L.P.; Malhi Y.; Higuchi, N.; Laurance, W.F.; Núñez, P.V.; Vásquez, R.M.; Laurance, S.G.; Ferreira, L.V.; Stern, M.; Brown, S.; Grace, G. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282: 439-442.
- Orellana, E.; Koehler, A.B. 2008. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer, *Ciências Agrárias Ambiental*, Curitiba, 6(2): 229-237.
- Overman, J.P.M.; White, H.J.L.; Saldarriaga, J.G. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 10: 207-218.
- Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Nelson, R.F. 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, Toowoomba, 37(3): 71-95.
- Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Nelson, R.F. 2003. Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Ontário, 29(05): 564 - 577.
- Pretzsch, H. 1995. Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 114: 188-209.
- Ribeiro, C.A.A.S. 2002. *Floresta de Precisão*. In: Machado, C.C. (Ed.). Colheita Florestal. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. 1:311-335.
- Roberts, S.D.; Dean, T.J.; Evans, D.L. 2005. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. *Forest Ecology and Management*, 213(1): 54-70.
- Rolim, S.G.; Thadeu, H.; Couto, Z.; Jesus, R.M. de; França, J.T. 2006. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). *Acta Amazonica*, Manaus, 36(1): 107-114.

- Runkle, J.R. 1981. Gap formation in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, 62: 1041-1051.
- Runkle, J.R. 1982. Patterns of disturbance in some oldgrowth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 63: 1533-1546.
- Runkle, J.R. 1990. Gap dynamics of Ohio-*Fagus* forest and speculations on the geography of disturbance. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 632-642.
- Ryan, T.P. 2011. *Estatística moderna para engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 324p.
- Santos, J. 1996. *Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 121p.
- Santos, J.; Paula-Neto, F.; Higuchi, N.; Leite, H.G.; Souza, A.L.; Vale, A.B. 2001. Modelos estatísticos para estimar a fitomassa acima do nível do solo da floresta tropical úmida da Amazônia Central. *Revista Árvore*, 25(4): 445-454.
- SAS Institute.1990. *SAS User's guide: statistics*. Release 6.03. Cary, 584p.
- Sasaki, T.; Imanishi, J.; Ioki, K.; Morimoto, Y.; Kitada, K. 2008. Estimation of Leaf Area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. *Landscape Ecological Engineering*, Chicago, 4:47-55.
- Schneider, P.R.; Schneider, P.R.P. 2008. *Introdução ao manejo florestal*. UFSM, Santa Maria, 566p.
- Schroeder, P. 1992. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. *Forest Ecology and Management*, 50: 31-41.
- Swaine, M.D.; Whitmore, T.C. 1988. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio*, 75: 81-86.
- Scolforo, J.R.S.; Oliveira, A.D.; Acerbi Júnior, F.W. 2008. *Inventário Florestal de Minas Gerais: Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fisionomias da Flora Nativa*. UFLA, Lavras, Minas Gerais. 216p.
- Scolforo, J.R.S.; Pérez, J.F.M.; Mello, J.M.; Oliveira, A.D.; Camolesi, J.F.; Borges, L.F.R.; Acerbi Júnior, F.W. 2004. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e

quantidade de mourões para candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish). *Cerne*, 10(1): 87-102.

Scolforo, J.R.S. 1998. *Biometria florestal: medição e volumetria de árvores*. Lavras: UFLA/FAEPE, 310p.

Scolforo, J.S.R. 1998. *Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas*. UFLA/FAEPE, Lavras, 451p.

Silva, J.L.R. 2007. *Modelos volumétricos, fatores de forma e equação de afilamento para floresta de terra firme da região do rio Aru, município de Portel-Pará*. Dissertação (Mestrado em Silvicultura e Manejo Florestal), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. 85p.

Silva, R.P. 2007. *Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Fundação Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil, 152p.

Silveira, L.H.C.; Rezende, A.V.; Vale, A.T. 2013. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. *Acta Amazônica*, 43(2): 179 - 184.

Sirf, 2014. *CSR Powered by aptX - Application Solutions*, (<http://www.sirf.com/products/application>). Acesso em 13/01/2014.

Souza, G.S. 1998. *Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear*. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-SEA, 505p.

Stansfield, W.F.; McTague, J.P.; Lacapa, R. 1992. Dominant height and site index equations for Douglas Fir and Engelmann Spruce in East. *West. J. Appl. For*, Central Arizona, 7(2):40-44.

Statgraphics. 2006. *Statgraphics Centurion XV: User's guide*. StatPoint Inc. EUA, 299p.

Tabarelli, M.; Mantovani, W. 1999. Clareiras naturais e a riqueza de espécies pioneiras em uma floresta atlântica montana. *Revista Brasileira de Botânica*, 59: 251-261.

- Tiede, D.; Hochleitner, G.; Blaschke, T. 2005. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: Stilla, U.; Rottensteiner, F.; Hinz, S. (Eds) *CMRT05*. Vienna, Austria, 3: 09-14.
- Vale, A.T. do; Sarmiento, T.R.; Almeida, A.N. 2005. Caracterização e Uso de Madeiras de Galhos de Árvores Provenientes da Arborização de Brasília - DF. *Ciência Florestal*, 15(4): 411-420.
- Vanclay, J. K. 1994. *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. Wallingford, CAB International, 1994, 312 p.
- Whitmore, T.C. 1996. A review of some aspects of tropical rain forest seedling ecology with suggestion for further enquiry. In: Swaine, M.D. (Ed.) *The ecology of tropical forest tree seedlings*. Unesco, Paris, 3-39p.
- Whittaker, R.H.; Woodwell, G.E. 1971. Measurement of net primary production of forests (French summ.) In: P. Duvigneaud, ed. *Productivity of Forest Ecosystems: Proc. Brussels Symp. Ecology and Conservation*, 4: 159-175.
- Wink, C.; Monteiro, J.S.; Reinert, D.J.; Liberalesso, E. 2012. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades, *Scientia Forestalis*, Piracicaba, 40(93): 057-067.
- Zonete, M.F. 2009. *Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de Eucalyptus sp no sul da Bahia*. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, São Paulo, 95 p.

Anexo A - Relação das espécies que compõem o banco de dados das árvores perfiladas pelo LIDAR e mensuradas por meio da morfometria de copa, cubagem rigorosa e dimensões de clareiras, Floresta Estadual do Antimary (FEA), Acre, Brasil.

Nome científico	Família	Nome Popular
<i>Anacardium giganteum</i> Hancock ex Engl.	Anacardiaceae	Cajuí
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.	Fabaceae	Garapeira
<i>Aspidosperma macrocarpon</i> Mart.	Apocynaceae	Pereiro
<i>Aspidosperma parvifolium</i> A. DC.	Apocynaceae	Amarelão
<i>Astronium lecointei</i> Ducke.	Anacardiaceae	Aroeira
<i>Barnebydendron riedelii</i> (Tul.) J.H. Kirkbr.	Caesalpiniaceae	Guaribeiro
<i>Brosimum alicastrum</i> subsp. <i>bolivarense</i> (Pittier) C.C.Berg	Moraceae	Manitê
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitiba
<i>Castilla ulei</i> Warb.	Moraceae	Caucho
<i>Cedrela odorata</i> L	Meliaceae	Cedro
<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Malvaceae	Samaúma
<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav	Moraceae	Guariuba
<i>Couratari macrosperma</i> A.C.Sm.	Lecythidaceae	Tuari
<i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith	Caesalpiniaceae	Tamarino
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Fabaceae	Cumaru ferro
<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	Caesalpiniaceae	Orelhinha
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC). Samori	Lecythidaceae	Castanharana
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) SOGrose	Bignoniaceae	Ipê
<i>Hymenaea courbaril</i> var. <i>subsessilis</i>	Caesalpiniaceae	Jatobá
<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber	Caesalpiniaceae	Jutaí
<i>Hymenolobium nitidum</i> Benth.	Caesalpiniaceae	Angelim
<i>Manilkara surinamensis</i> (Miq.) Dubard	Sapotaceae	Maçaranduba
<i>Pouteria bangii</i> (Rusby) T.D.Penn.	Sapotaceae	Abiuarana
<i>Qualea tessmannii</i> Mildbr.	Vochysiaceae	Catuaba
<i>Schizolobium amazonicum</i> Ducke	Caesalpiniaceae	Pinho cuiabano
<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Swart	Burseraceae	Breu vermelho