

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

ARNALDO DE MELO JUNIOR

**USO DE *UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS* (UAS) EM UM INVENTÁRIO
FLORESTAL CENSITÁRIO, PARA ESTIMATIVA DO DAP**

**RIO BRANCO
ACRE – BRASIL
AGOSTO – 2019**

ARNALDO DE MELO JUNIOR

**USO DE *UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS* (UAS) EM UM INVENTÁRIO
FLORESTAL CENSITÁRIO, PARA ESTIMATIVA DO DAP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Acre, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para a obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

**RIO BRANCO
ACRE – BRASIL
AGOSTO – 2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

M528u

Melo Junior, Arnaldo de, 1984 -

Uso de *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) em um inventário florestal censitário, para estimativa do DAP / Arnaldo de Melo Junior; orientador: Dr. Evandro Orfanó Figueiredo. – 2019.

40 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Mestre em Ciência Florestal, Rio Branco, 2019.

Inclui referências bibliográficas e apêndice

1. Regressão linear. 2. Biometria florestal. 3. Fotogrametria. I. Figueiredo, Evandro Orfanó (orientador). II. Título.

CDD: 634



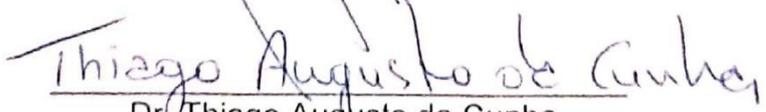
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Ciências Biológicas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
FLORESTAL, MESTRANDO: **ARNALDO DE MELO JUNIOR**,
REALIZADA NO DIA VINTE E NOVE DE ABRIL DE 2019.

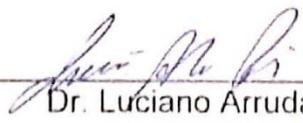
Às oito horas e trinta minutos do dia vinte e nove do mês de abril do ano de 2019, na sala ambiente do curso de Engenharia Agrônômica, da Universidade Federal do Acre, realizou-se a Defesa de Dissertação intitulada: "**USO DE UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (UAS) EM UM INVENTÁRIO FLORESTAL CENSITÁRIO, PARA ESTIMATIVA DO DAP**", de autoria do mestrando: **Arnaldo de Melo Junior**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado (UFAC). Na ocasião, a Comissão Examinadora esteve constituída pelos membros: **Dr. Evandro Orfanó Figueiredo (Presidente/EMBRAPA)**; **Dr. Thiago Augusto da Cunha (CCBN/UFAC)**; **Dr. Luciano Arruda Ribas (EMBRAPA)**; **Dr. Marco Antônio Amaro (Suplente/UFAC)**. Após a exposição oral, houve arguição pelos examinadores e ao final da arguição, reaberta a sessão pública, o discente foi considerado **APROVADO** pela Comissão Examinadora. E para constar, foi lavrada a presente Ata, que será assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Dr. Evandro Orfanó Figueiredo
(Presidente/ EMBRAPA)



Dr. Thiago Augusto da Cunha
(CCBN/UFAC)



Dr. Luciano Arruda Ribas
(EMBRAPA)



Dr. Marco Antônio Amaro
(Suplente/ UFAC)

À minha filha, Sofia Enes de Melo.

Dedico.

Agradecimentos

À Deus por me permitir a vida para buscar o conhecimento.

À Universidade Federal do Acre (UFAC) e ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal (Ciflor) pelas oportunidades oferecidas.

À Embrapa pelo apoio pela disponibilização de profissionais, equipamentos e do espaço físico para a realização da pesquisa.

Ao Instituto de Meio Ambiente do Acre (IMAC), na pessoa do meu irmão, Fabiano Cavalcante Pereira, por liberar parte da minha carga horária das atividades profissionais para o cumprimento dos créditos teóricos do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudo, no segundo ano do mestrado.

Ao meu orientador professor Dr. Evandro Orfanó Figueiredo pelos ensinamentos, pela paciência e dedicação e por indicar os caminhos necessários à realização deste trabalho.

Aos demais professores e colaboradores do Ciflor, que contribuem para a formação de mestres e para o desenvolvimento de tecnologias e novos conhecimentos.

Aos pesquisadores da Embrapa Acre, Msc Daniel Para e MSc Luiz Cláudio que sempre contribuíram com suas experiências e ensinamentos.

À minha família por “segurarem a barra” sempre me dando o apoio, incentivo e auxílio necessários em todos os momentos.

À todos colegas de turma DTOPs (Elaine, Jamila, Jamile, José Renato e Israel) pelo apoio nas dificuldades das aulas, e em especial à Ana Paula, Cleverson e Diogo, pelas boas conversas e companhias “além mestrado”.

Aos colegas de outros programas e turmas de mestrado, em especial ao “hermano” hondurenho Melbin Gomez Guillen, que esteve presente apoiando diariamente durante no segundo ano de pesquisa e a minha amiga e colega Fernanda Portela Madeira, que me apoiou e incentivou a continuar e a concluir este curso, e sempre esteve presente com boas conversas e palavras positivas.

Por fim, à todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APC	Área de projeção da copa
CAP	Circunferência à altura do peito
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
DAP	Diâmetro à altura do peito
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGC	Diâmetro geométrico da copa
DMC	Diâmetro médio da copa
EGM	Earth Gravitational Model
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GCP	Ground control point
GNSS	Sistema global de navegação por satélites
GPS	Sistema de posicionamento global
GSD	Ground sampling distance
IMU	Unidade inercial de movimento
MDS	Modelo digital de superfície
Modeflora	Modelo digital de exploração florestal
PC	Perímetro da copa
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
SIGs	Sistemas de informações geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudos. Reserva florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2019.	6
Figura 2. Esquema demonstrativo dos principais componentes da RPA DJI Phantom 4 Pro:.....	8
Figura 3. Ponto de controle de solo (ground control point – GCP) apropriado com GNSS L2, Reserva Florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2019.....	11
Figura 4. Detalhe da segmentação das copas da área de estudos, feitas com o software e-Cognition: à esquerda, vista geral de um segmento da área de estudos e à direita, detalhe da copa de uma árvore. Reserva florestal Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2018.....	12
Figura 5. Esquema explicativo da metodologia proposta por Barusso (1977).	13
Figura 6. Polígonos das áreas de projeção da copa das árvores dominantes e codominantes, inseridos na área de estudos.	16
Figura 7. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de simples entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.	20
Figura 8. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de simples entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.	20
Figura 9. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de tripla entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das posições e erros dos GCPs, coletados com GNSS L2, pós-processados com a base RIOB-93911	15
Tabela 2 – Matriz de correlações entre as variáveis independentes da morfometria da copa e a variável dependente DAP, das árvores dominantes e codominantes da reserva florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.	16
Tabela 3 – Rotina de todos os modelos possíveis, considerando o desenvolvimento de modelos de simples, dupla e tripla entrada	17
Tabela 4 – Equações ajustadas e resultados das rotinas estatísticas	18

RESUMO

MELO JUNIOR, Arnaldo. Universidade Federal do Acre, agosto de 2019. **Uso de *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) em um inventário florestal censitário, para estimativa do DAP.** Orientador: Evandro Orfanó Figueiredo. Os recursos naturais sempre fizeram parte das necessidades humanas. A madeira é um dos principais recursos, estando presente diariamente na vida do homem. Porém, mesmo se tratando de um recurso renovável, seu uso precisa ser regulado para que a exploração indiscriminada não leve a extinção de espécies florestais. O inventário florestal censitário é o instrumento que qualifica e quantifica esse recurso, sendo estabelecidas regras para sua execução. A forma tradicional de realização do inventário é morosa e onerosa, surgindo assim a necessidade de desenvolver tecnologias que venham a agilizar esse processo. Nesse cenário surgem as *unmanned aircraft systems* (UAS) popularmente conhecidas como *drones*, que possuem poderosas câmeras capazes de registrar imagens com potencial para processamento por fotogrametria. O objetivo desse estudo foi desenvolver modelos e selecionar equações capazes de estimar o diâmetro à altura do peito (DAP) de árvores dominantes e codominantes, a partir de dados morfométricos da copa, obtidos por fotogrametria de imagens registradas por UAS. A área de estudos foi de 170 hectares de floresta densa, localizados na reserva florestal da Embrapa Acre. Foram realizados voos sobre a área previamente inventariada e o processamento das imagens registradas gerou as variáveis área de projeção da copa (APC), diâmetro geométrico da copa (DGC), diâmetro médio da copa (DMC) e perímetro da copa (PC), que após a análise de correlação, apresentaram correlação superior a 0,65 com o DAP. Foram então gerados quatro modelos de simples entrada, três de dupla entrada e dois de tripla entrada, que após a rotina de processamento estatístico, geraram as doze equações correspondentes. Para a seleção das equações foram considerados os critérios estatísticos R^2_{Ajustado} , S_{xy} , $S_{xy}\%$ e o critério PRESS. Após a análise dos resultados estatísticos concluiu-se, para os modelos de simples entrada, o que melhor estimou o DAP foi o que utiliza a variável APC, e gerou a equação $DAP = 36,5784 + 0,178071*APC$. Dentre os modelos de dupla entrada, o que melhor se ajustou aos dados foi o composto pelas variáveis APC e PC, que gerou a equação $DAP = 33,0298 + 0,141623*APC + 0,0551307*PC$. Já dentre os modelos de tripla entrada, o modelo que utiliza variáveis APC, DMC e PC, e que gerou a equação $DAP = 41,6576 + 0,169311*APC - 0,963895*DMC + 0,0609778*PC$, foi considerado o melhor para estimativa do DAP. Esses três modelos são indicados para estimativa do DAP a partir de dados morfométricos da copa.

Palavras-chaves: Regressão linear, Biometria florestal, Fotogrametria, Automação florestal, Drones.

ABSTRACT

MELO JUNIOR, Arnaldo. Federal University of Acre, August 2019. **Using unmanned aircraft systems (UAS) in a censory forest inventory for DBH estimation.** Advisor: Evandro Orfanó Figueiredo. Natural resources have always been part of human needs. Wood is one of the main resources, being present daily in the life of man. However, even if it is a renewable resource, its use needs to be regulated so that indiscriminate exploitation does not lead to the extinction of forest species. The census forest inventory is the instrument that qualifies and quantifies this resource, and rules for its implementation are established. The traditional way of carrying out the inventory is time consuming and costly, thus the need to develop technologies that will speed up this process. In this scenario arise the unmanned aircraft systems (UAS) popularly known as drones, which have powerful cameras capable of recording images with potential for photogrammetry processing. The aim of this study was to develop models and select equations capable of estimating the diameter at breast height (DBH) of dominant and codominant trees, based on crown morphometric data obtained by photogrammetry of images recorded by UAS. The study area was 170 hectares of dense forest, located in the Embrapa Acre forest reserve. Flights were performed over the previously inventoried area and the processing of the recorded images generated the canopy projection area (APC), canopy geometric diameter (DGC), canopy mean diameter (DMC) and canopy perimeter (PC) variables. After the correlation analysis, they presented a correlation higher than 0.65 with the DBH. Four single-entry models, three double-entry and two triple-entry models were generated, which after the statistical processing routine generated the twelve corresponding equations. For the selection of the equations, the statistical criteria $R_{2Ajusted}$, S_{xy} , $S_{xy}\%$ and the PRESS criterion were considered. After the analysis of the statistical results, it was concluded, for the simple entry models, what best estimated the DBH was the one that uses the APC variable, and generated the equation $DBH = 36.5784 + 0.178071 * APC$. Among the double entry models, the best fit for the data was the APC and PC variables, which generated the equation $DBH = 33.0298 + 0.141623 * APC + 0.0551307 * PC$. Among the triple input models, the model that uses APC, DMC and PC variables, which generated the equation $DBH = 41.6576 + 0.169311 * APC - 0.963895 * DMC + 0.0609778 * PC$, was considered the best for DBH estimation.. These three models are indicated for DBH estimation from crown morphometric data.

Keywords: Linear regression, forest biometry, photogrammetry, forest automation, drones.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	5
	2.1. Objetivo geral.....	5
	2.2. Objetivos específicos	5
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	6
	3.1. Área de estudos.....	6
	3.2. Inventário florestal de precisão.....	7
	3.3. UAS utilizado.....	7
	3.4. Projeto fotogramétrico	9
	3.5. Ponto de controle no solo	10
	3.6. Processamento das imagens aéreas	11
	3.7. Segmentação das copas das árvores dominantes e codominantes	11
	3.8. Obtenção das variáveis explicativas	12
	3.9. Análise de correlação para seleção das variáveis explicativas	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
	4.1. Melhor equação de simples entrada	19
	4.2. Melhor equação de dupla entrada.....	20
	4.3. Melhor equação de tripla entrada	21
5	CONCLUSÕES.....	22
	APÊNDICE A	27
	APÊNDICE B	28

1 INTRODUÇÃO

O inventário florestal é o instrumento utilizado pela engenharia para a qualificação e quantificação dos recursos naturais de uma floresta, sendo a madeira o principal desses recursos, devido a suas inúmeras aplicações. Tradicionalmente, o inventário florestal censitário madeireiro é realizado com a segmentação da área de floresta a ser inventariada em talhões menores, onde são preestabelecidas linhas de caminamento e a partir destas, são observadas e registradas informações necessárias sobre cada indivíduo arbóreo, a partir de um diâmetro mínimo, definido de acordo com o objetivo do inventário.

Em decorrência das dificuldades ambientais nas florestas tropicais e dificuldades em se empregar equipamentos de mensuração, a maioria das variáveis registradas no inventário são apropriadas por observação visual, sendo a CAP – circunferência à altura do peito, medida à 1,30 metros do solo, a única variável mensurada diretamente. Porém, essa forma tradicional de mensuração das árvores, onera muito tempo, além de expor a força humana aos riscos e intemperes da floresta.

Trabalhos como o de Figueiredo et al. (2007), Ferraz et al. (2014) e Figueiredo et al. (2018), indicam que nos últimos 15 anos, o desenvolvimento de tecnologias utilizando principalmente os Sistemas de Informações Geográficas – SIGs, vem auxiliando nas operações do inventário florestal, principalmente na atividade de localização das árvores. Atualmente, para cada árvore inventariada é registrada com um receptor Global Navigation Satellite System - GNSS, uma coordenada de localização geográfica, e esta, além da posição da árvore, fornece outros dados como a altitude em relação ao nível do mar, o que, associada a imagens de satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), permite a modelagem do terreno, auxiliando no planejamento da exploração, principalmente na alocação de estradas e deslocamento de veículos.

Figueiredo et al. (2007) considera que, apesar dos avanços na qualidade das informações florestais com emprego de técnicas de precisão por meio do uso do receptor GNSS e geoprocessamento incorporados ao planejamento da exploração florestal, os custos e a morosidade do inventário censitário para florestas tropicais continuam sendo um problema de base tecnológica a ser resolvido.

Inamasu et al. (2016) definem a automação como um sistema no qual os processos operacionais de produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitorados, controlados e executados por meio de máquinas e ou dispositivos mecânicos, eletrônicos ou computacionais para ampliar a capacidade de trabalho humano. Desse modo, a automação exerce a sua função sobre processos agrícolas, pecuários e florestais para aumentar a produtividade; otimizar o uso de tempo, insumos e capital; reduzir perdas na produção; aumentar a qualidade dos produtos e melhorar a qualidade de vida do trabalhador rural.

Observa-se assim, que a automação das necessidades humanas é uma tendência nos mais diversos segmentos da sociedade. Na atividade florestal não é diferente e a todo momento se buscam novas tecnologias para otimizar tempo e dinheiro. Diante disso, aliam-se às atividades do inventário florestal as aeronaves não tripuladas, tradução do termo inglês *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), também conhecidos popularmente como drones.

As UAS e os aerodrones se popularizaram nos últimos anos para fins recreativos por possuírem acoplado ao equipamento de voo, câmeras que fotografam e filmam com qualidade. Porém, as UAS são equipamentos completos, com sensores com GNSS, altímetro, bússola, giroscópio, transponder ultrassônico e infravermelho, estando todos vinculados a uma unidade inercial de movimento - IMU (DJI, 2019). Todas as informações geradas por estes sensores ficam associadas aos metadados das fotos registradas, o que permite o processamento e geração de produtos por fotogrametria.

Atualmente, a análise da viabilidade para a realização de um manejo florestal é realizada por meio de um inventário diagnóstico, onde são instaladas parcelas na área de interesse e essas são inventariadas, gerando as informações necessárias à análise. Soares et al. (2015) concluíram que no inventário clássico – moroso e oneroso - existem várias fontes de erro associadas sendo uma delas o fato de se medir apenas uma amostra que se pretende representar ou analisar, e com o uso de UAS, pode obter fotografias aéreas de alta resolução a baixo custo considerando a cobertura da

totalidade da área. Nesse mesmo estudo concluem que as UAS podem ser usadas em processos de monitorização, uma vez que permitem obter fotografia georreferenciada a custo reduzido permitindo voar grandes áreas em curtos intervalos de tempo. Por outro lado, os autores afirmam que ainda existem aspetos a melhorar na utilização de UAS no inventário florestal, como o nível dos algoritmos de classificação e da otimização do software para redução do tempo de processamento, assim como a exploração de imagem multiespectral para uma avaliação mais detalhada do estado fitossanitário, por exemplo.

Para Graça et al. (2017), a utilização de UAS como técnica e/ou métodos de aquisição de imagens de alta resolução para sensoriamento remoto aparece como uma alternativa mais viável quando comparado com as técnicas de sensoriamento remoto obtidas via satélite.

Oliveira Sobrinho et al. (2018) apresentam várias aplicações e estudos da utilização das UAS no planeamento agrícola, porém, concluem que ainda são escassas as pesquisas que apresentam metodologias e resultados promissores utilizando imagens de UAS nos processos de silvicultura de precisão e concluem em seu estudo que, de forma geral, o uso de UAS apresentou resultados e rendimentos melhores que o método convencional de medição para os processos produtivos florestais.

Estudos como os de Figueiredo et al. (2016), Cunha et al. (2013), Wink (2012), Roman et al. (2009), Durlo (2004) e Burger (1939) contemplam a importância da morfometria da copa das árvores. Nesse sentido, surge a possibilidade de, por meio de uma regressão estatística, estabelecer a relação entre as informações morfométricas da copa obtidas por fotogrametria de imagens de alta resolução registradas com UAS, com o seu respectivo CAP. A altura comercial ou altura total por exemplo, são estimadas, podendo levar a erros na regressão. O DAP ainda é a fonte de dados para a obtenção da área basal, que é outra variável com aplicação no planeamento florestal. A partir da exploração florestal do primeiro compartimento de produção é possível realizar a cubagem rigorosa das árvores cortadas e, posteriormente, ajustar equações de volume comercial, utilizando os mesmos dados morfométricos de copa obtidos com UAS.

O ajuste de modelos para biometria florestal é uma importante ferramenta para estimar dados de difícil mensuração. Estudos como o de Calegario et al. (2005) vem contribuindo para o aperfeiçoamento dos ajustes de modelos. Para a conclusão da qualidade de ajuste dos modelos aos dados são considerados os critérios coeficiente de

determinação ajustado R^2_{Ajustado} , o erro padrão da estimativa absoluto (S_{yx}) e percentual ($S_{yx\%}$). Além desses critérios estatísticos, também é avaliado o gráfico de distribuição dos resíduos. Esta análise é decisiva na avaliação da qualidade das estimativas, pois permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo de toda a linha de regressão.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo desse trabalho foi desenvolver equações lineares de simples, dupla e tripla entradas que possam estimar o DAP de árvores dominantes e codominantes, a partir de dados morfométricos da copa, obtidos por fotogrametria de imagens aéreas de *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), visando a automação do inventário florestal.

2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Gerar dados de morfometria da copa, a partir da fotogrametria de imagens de alta resolução registradas com o uso de *Unmanned Aircraft Systems* (UAS);
- Identificar a existência de correlação entre os dados de morfometria da copa, com o DAP das árvores dominantes e codominantes coletados em inventário florestal de precisão;
- Desenvolver modelos de regressão linear, de simples, dupla e tripla entrada, utilizando as variáveis morfométricas de copa;
- Selecionar dentre os modelos desenvolvidos, os que geraram as melhores equações para a estimativa do DAP das árvores dominantes e codominantes, de acordo com a quantidade de entradas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudos

Este estudo foi realizado em uma área de 170 hectares, localizada dentro da área de reserva florestal da Embrapa Acre, distante cerca de 15 km da cidade de Rio Branco. A localização central da área do estudo é registrada na coordenada UTM/WGS84 (*Universal Transversa de Mercator/World Geodetic System*) 19L 643951E e 8890451 N (Figura 1). A vegetação predominante no local é classificada por Acre (2010), como sendo uma floresta densa, com pequenas ocorrências de floresta aberta com presença de palmeiras e bambu.

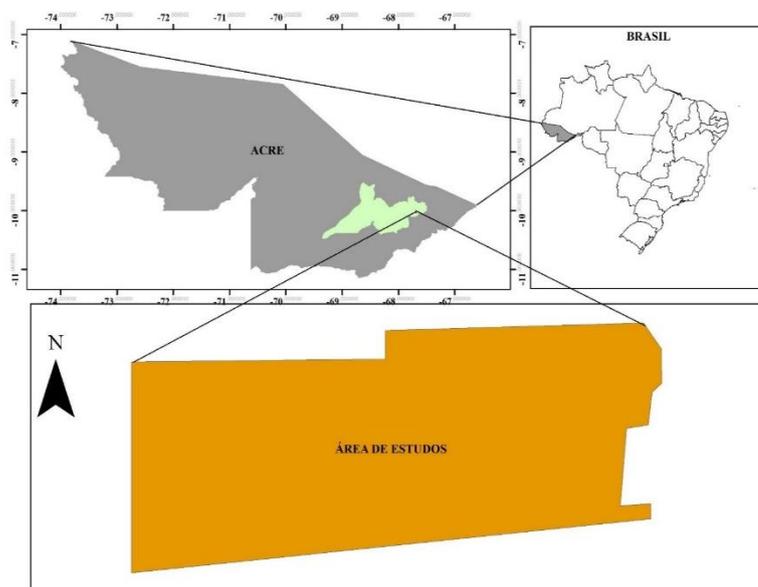


Figura 1. Mapa de localização da área de estudos. Reserva florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2019.

3.2. Inventário florestal de precisão

A base de dados inicial do estudo foi o inventário de todas as árvores de espécies florestais arbóreas comerciais e não comerciais, com DAP igual ou superior a 40 cm. Para o registro e localização das árvores foram consideradas as recomendações da metodologia de planejamento florestal Modelflora recomendado por Figueiredo et al., (2007). Para cada árvore inventariada foi apropriada uma coordenada geográfica e, posteriormente, fixada uma placa de alumínio com numeração sequencial de 1 a “n”, além de realizados os registros do nome popular, circunferência à altura do peito – CAP (cm), altura comercial da árvore (m) por estimativa visual e qualidade do fuste (1 – reto, 2 – levemente torto e 3 – tortuoso, quebrado ou ocado). Na identificação da espécie florestal (nome popular) foram considerados os conhecimentos de um parobotânico com larga experiência regional e para algumas espécies que compõem o portfólio de pesquisa da Embrapa, foi coletada exsicata e depositada em herbário.

A CAP, que é convertida para DAP, é geralmente bem correlacionada com variáveis importantes do povoamento, tais como: volume, área basal, sortimentos entre outras (BAILEY; DELL, 1973).

3.3. UAS utilizado

A UAS utilizada nos voos foi um multirrotor DJI Phantom 4 Professional (P4 Pro). Foi escolhida em função das características da paisagem, considerando que a área de estudos é uma floresta nativa, que não permite pousos e decolagens de UAS de asa fixa, que necessitam de espaço para projeção de uma rampa e decolagem e pouso. A UAS utilizada possui todas as homologações e registros junto à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Possui um peso total de *payload* de 1,388 kg e sensores eletrônicos de bússola, acelerômetro com controladora eletrônica de velocidade, giroscópio de três eixos, sistema GNSS (GPS e Glonass) de alta sensibilidade, sensores ultrassônicos e infravermelhos anticolisão (Figura 2).

A autonomia de voo máximo é de 30 minutos, porém, considerando a segurança de voo, o tempo útil de mapeamento nunca foi superior a 15 minutos. É equipada

originalmente com uma câmera com sensor RGB de 1” CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) de 20 megapixel, lentes de autofoco de 24 mm (formato equivalente a 35 mm), acoplada a um gimbal de três eixos para estabilização eletrônica da imagem. A estação de solo utilizada tem duas opções de frequência (2.400–2.483 GHz e 5.725–5.825 GHz) e o enlace máximo com o rádio é de até 7.000 m de distância horizontal (DJI, 2019).

Para a operação da estação de solo foi utilizado um tablet modelo Apple iPad mini 4, chip A8 de segunda geração com arquitetura de 64 bits e coprocessador M8, com 128 GB de capacidade de armazenamento.

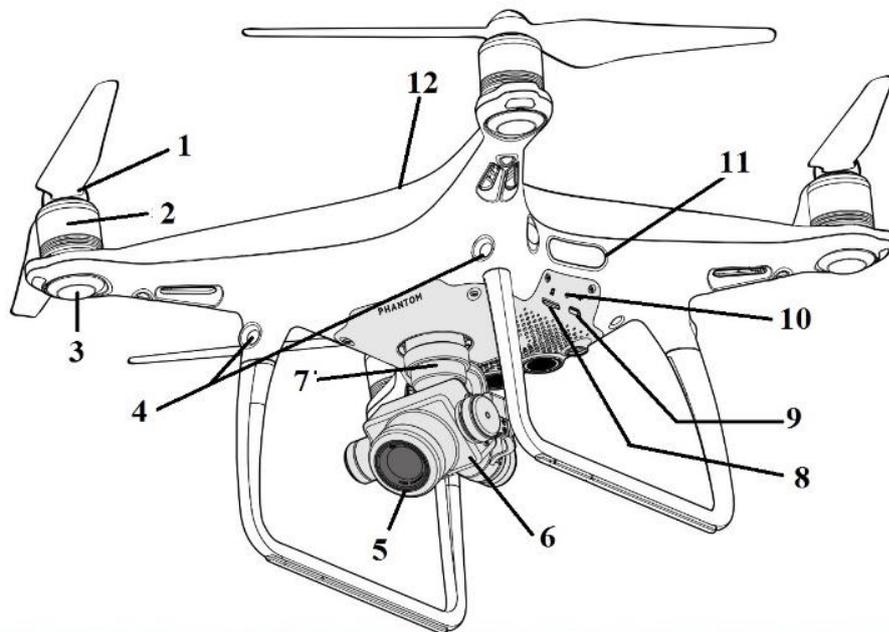


Figura 2. Esquema demonstrativo dos principais componentes da RPA DJI Phantom 4 Pro:

1) hélice de encaixe (modelo prata e preto); 2) rotor; 3) led indicativo de condição funcional; 4) sensor ultrassônico de desvio de obstáculos; 5) protetor de lente rosqueável (sem filtro de luz); 6) câmera fotográfica digital com foco fixo e obturador mecânico; 7) gimbal eletrônico de três eixos; 8) slot de inserção do cartão microSD; 9) slot de conexão de cabo USB; 10) ponto de reset; 11) sensor infravermelho de desvio de obstáculos; e 12) posição superior onde se encontra o GNSS na parte interna da *shell*. Adaptado de DJI (2019).

3.4. Projeto fotogramétrico

A Instrução do Comando da Aeronáutica ICA 100-40, reeditada em novembro de 2018, regulamenta os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por aeronaves não tripuladas. Atendendo a todas essas regulamentações, todos os voos para coleta de imagens da copa das árvores da área de estudos obedeceram aos procedimentos regulamentados pela ICA 100-40, e suas autorizações de voo requeridas e autorizadas pelo DECEA por meio do Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas - SARPAS.

Para a coleta das imagens aéreas, foram planejadas e executadas missões com voos na categoria *Visual Line-Of-Sight* - VLOS semiautônoma. A altura média dos voos foi de 120 m do dossel e a velocidade média de 13 m.s⁻¹ para dias de baixa luminosidade e 15 m.s⁻¹ para dias de pleno sol. Para a obtenção de imagens com qualidade para o processamento por fotogrametria, foram estabelecidas as sobreposições entre as fotos de 81,36% lateral e 86% longitudinal, possibilitando assim, produzir uma ortofoto com GSD (*ground sampling distance*) adequado para a obtenção dos dados morfométricos da copa. Além das configurações de voo, também foi configurada a câmera RGB (Red, Blue, Green), acoplada a UAS, de modo a possibilitar a captura das imagens com uma estimativa Δ “*rolling shutter*” inferior a 1,2 pixel, conforme as recomendações de Figueiredo e Figueiredo (2018); PIX4D (2019). A estimativa Δ “*rolling shutter*” permite conhecer antes de cada voo qual será o descolamento de pixels na imagem coletada. Durante o voo, a câmera sempre foi disposta na posição nadir e o sistema de posicionamento do GNSS da UAS configurado para o datum horizontal WGS84 e vertical EGM96.

Todos esses parâmetros de configuração do equipamento de voo e da câmera RGB definidos previamente foram inseridos no aplicativo *Litchi* (Android, IOS ou Web), sendo que a primeira missão de voo do aplicativo *Litchi* foi planejada e inserida no sistema (*website FlyLitchi*) de forma manual, considerando as características do voo previamente planejadas para a obtenção de ortofotos úteis, bem como a autonomia do equipamento e, posteriormente, esses voos planejados são replicados até recobrir por inteiro a área de interesse e inseridos no dispositivo móvel que será acoplado ao rádio controle.

Os voos foram realizados no mês de março, sendo este, o mês em que as copas das árvores das florestas ombrófilas densas da região amazônica encontram-se com suas copas bem definidas, por ser o final do período de inverno amazônico.

3.5. Ponto de controle no solo

Pontos de Controle no Solo é a tradução do termo inglês *Ground Control Point* – GCP, que são coordenadas precisas de locais identificados na ortofoto, que permitem alocar e dimensionar esta com as suas exatas dimensões, atribuindo escala, orientação e a exata posição geográfica, e possibilitando assim a tomada de medidas de comprimento, área ou volume no modelo digital. A utilização de coordenadas precisas no registro das imagens impede a degradação desta já que, o GSD obtido no processamento é sempre inferior a 5 centímetros e qualquer coordenada com precisão inferior, degradaria a qualidade da imagem no processo de registro.

Para esse estudo foram apropriados três GCPs na borda da área de estudos, e suas localizações sinalizadas com alvos coloridos (verde, vermelho e laranja), facilmente identificadas na ortofoto (Figura 3). Ressalta-se que foram apropriados apenas três pontos devido a área de estudos ser uma floresta densa, não sendo possível a inserção de alvos no interior da área. Os três pontos foram dispostos de modo a formarem um triângulo e apresentaram distância média entre as posições de 1.516 m.

Para a apropriação dos pontos foi utilizado um receptor GNSS de frequência L2 (GPS e GLONASS) de 270 canais, configurado no datum horizontal WGS84 e vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*), com um tempo médio de apropriação de quatro horas e pós-processado com a base de referência RIOB 93911 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC).



Fonte: Figueiredo, 2019.

Figura 3. Ponto de controle de solo (ground control point – GCP) apropriado com GNSS L2, Reserva Florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2019.

3.6. Processamento das imagens aéreas

Para o processamento das imagens aéreas foi utilizado o *Software Pix4D Mapper*, que utiliza o algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* - SIFT para a obtenção de ortofotos com imagens da câmera em posição nadir e com alto *overlaps*, longitudinal e vertical (Lowe, 1999, 2004). O processamento permite a obtenção de um modelo digital de superfície (MDS) e uma nuvem de pontos de alta densidade e qualidade, sendo assim possível medir distâncias ou calcular áreas e volumes.

3.7. Segmentação das copas das árvores dominantes e codominantes

Após a elaboração da ortofoto foi realizada a segmentação e classificação das copas das árvores dominantes e codominantes no software *e-Cognition*, utilizando o algoritmo geobias, na função *multiresolution segmentation* (Drăgut et al., 2010). Os parâmetros de critério de composição da homogeneidade iguais a 0,5 e 0,5 para *shape* e *compactnes*, respectivamente. Para Figueiredo et al, 2018, esse critério é um dos principais parâmetros que define o sucesso de uma boa segmentação e que, dependendo do *Ground sampling distance* - GSD, da época do ano em que foi obtida

a ortofoto e da fenofase da maioria das árvores dominantes, esses parâmetros devem ser ajustados para a nova realidade do ambiente florestal.

A Figura 4 apresenta os polígonos das projeções das copas das árvores dominantes e codominantes, resultado da segmentação das copas. Tais polígonos foram exportados para a extensão *shapefile* para a continuidade do processamento, com a obtenção das variáveis explicativas no *software ArcGIS*. A Figura 4^a apresenta vários polígonos de projeção das copas e a Figura 4b, apenas um polígono apresentado com mais detalhes.

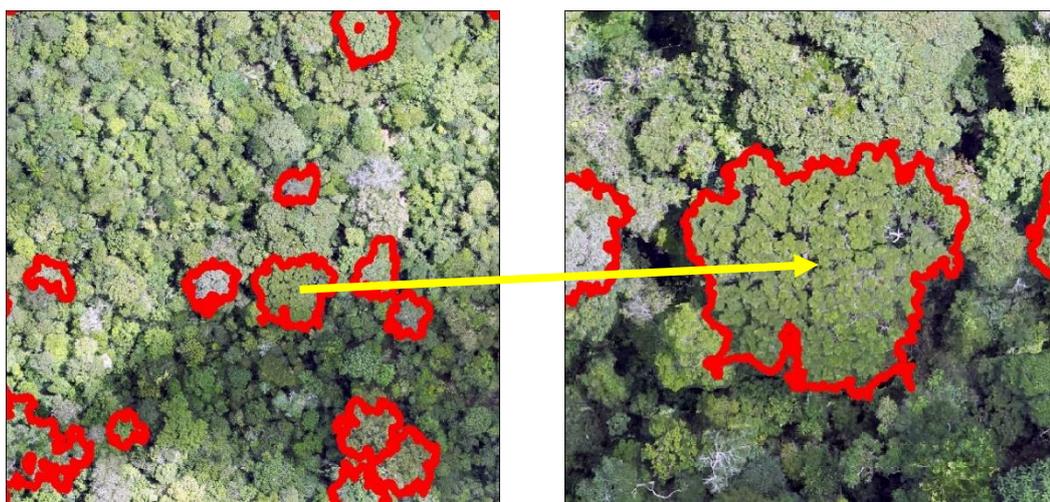


Figura 4. Detalhe da segmentação das copas da área de estudos, feitas com o software e-Cognition: à esquerda, vista geral de um segmento da área de estudos e à direita, detalhe da segmentação copa de uma árvore. Reserva florestal Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, 2018

3.8. Obtenção das variáveis explicativas

Para cada área da copa foi calculado, no *software ArcGIS* 10.2, de forma automática, a área de projeção da copa (m^2), o perímetro da copa (m) e o diâmetro geométrico da copa (m) e, de forma manual foi calculado o diâmetro médio da copa (m) de cada árvore. Para facilitar o entendimento dos gráficos, planilhas e resultados, foram definidas siglas para as variáveis explicativas, sendo a área de projeção da copa representada pela sigla “APC”, o diâmetro geométrico da copa por “DGC”, o diâmetro médio da copa por “DMC” e o perímetro da copa representado por “PC”.

A área de projeção da copa, o perímetro da copa e o diâmetro geométrico da copa foram obtidos por meio do preenchimento automático da tabela de atributos do *shapefile*, onde são consideradas todas as reentrâncias nas bordas do polígono. O diâmetro geométrico é calculado a partir de um círculo com o comprimento do perímetro, sendo esta a única variável que não foi calculada de forma automática. Para a obtenção dessa variável adotou-se a metodologia de Barusso (1977), que até os dias atuais demonstra ser a mais adequada para a obtenção de diâmetro médio, onde inicialmente, é identificado o maior diâmetro do polígono e, a partir desse, inseridos outros dois diâmetros perpendiculares, ambos a 45° do maior diâmetro. O diâmetro médio é calculado a partir da média dos dois diâmetros perpendiculares, conforme Figura 5.

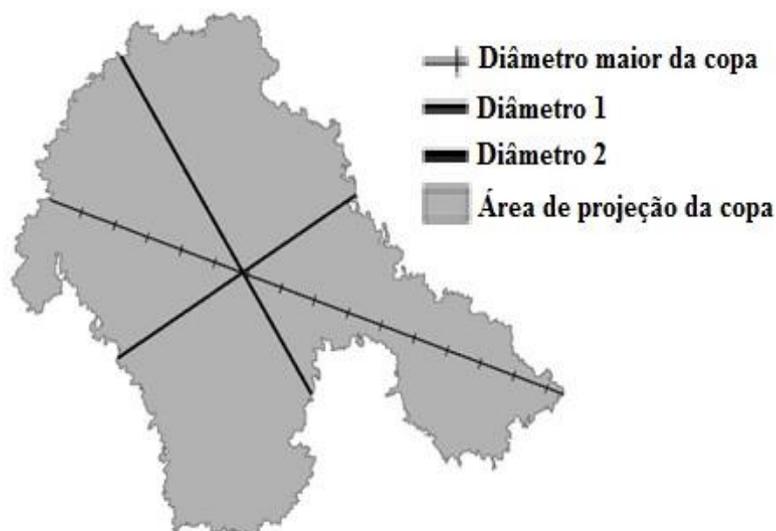


Figura 5. Esquema explicativo da metodologia proposta por Barusso (1977).

3.9. Análise de correlação para seleção das variáveis explicativas

Depois de geradas as variáveis explicativas, foi construído o banco de dados, vinculando os dados da morfometria da copa aos do inventário censitário. Esse banco de dados foi analisado no *software Statigraphic*, onde foram realizadas as rotinas de processamento, iniciadas com a análise multivariada de correlação entre as variáveis do banco de dados, e selecionado para compor os modelos, as variáveis que

apresentaram correlação superior a 0,65 com a variável dependente DAP e a partir dessas variáveis, montados todos os modelos possíveis.

A rotina de todos os modelos possíveis permite a análise do ajuste de todos os submodelos variáveis compostos por arranjo de “n” variáveis explicativas e sugere os melhores subconjuntos de simples, dupla e tripla entrada (RYAN, 2011).

Para cada um dos modelos ajustados foi realizada no *Software Statigraphic* a análise de influência, visando identificar se existem observações atípicas que estão influenciando no modelo. Os critérios de atipicidade considerados são os elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS e distância de Cook's. Esses critérios foram descritos por Chatterjee e Hadi (1986), Souza (1998) e Statgraphics (2006).

Também foi analisada a multicolineariedade ou intercorrelação entre as variáveis, que ocorre em uma análise de regressão múltipla quando as observações amostrais das variáveis independentes, ou combinações lineares destes são altamente correlacionadas (SCOLFORO, 2005). Uma vez detectada a multicolineariedade, podem seguir-se duas estratégias: eliminação de variáveis redundantes, ou regressões tendenciosas que eliminam os efeitos da redundância, sem eliminar variáveis (MATOS, 1995).

Para a seleção das melhores equações ajustadas à regressão, foram considerados os seguintes critérios estatísticos: Coeficiente de determinação ajustado - R^2_{Ajustado} , erro padrão percentual - $S_{xy}\%$ e o critério PRESS (cm^2), além da análise dos gráficos de distribuição dos resíduos.

O critério PRESS, avalia se a equação ajustada pode prever os valores observados em \hat{Y}_i , 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. Assim, o critério PRESS 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 SAS INSTITUTE (1990); STATGRAPHICS (2006). Essa estatística é analisada da seguinte forma: equações ajustadas que apresentam os menores valores de PRESS são as melhores dentre as equações ajustadas, ou seja, tem menor erro de predição. Para cada equação foi construído os gráficos de distribuição dos resíduos percentuais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram inventariadas 2.162 árvores (12,71 árvores/ha), das quais 1.969 (11,58 árvores/ha) possuem altura total acima de 15 metros e alcançaram o dossel superior, sendo consideradas dominantes ou codominantes, portanto, possível localizá-las pelas imagens aéreas das UAS. Os dados de DAP apresentaram uma distribuição da frequência de DAP em formato de “J” invertido, situação natural para uma floresta nativa, ou seja, com a diminuição do número de indivíduos, a medida em que se aumenta o DAP. Para Lamprech (1990), as florestas tropicais sem grande perturbação apresentam essa forma de distribuição diamétrica, caracterizando uma comunidade típica, autorregenerante, com maior número de indivíduos nas menores classes de diâmetro.

A fotogrametria das imagens de alta resolução coletadas com UAS, e aplicando um alto *overlap* lateral e longitudinal, permitiu produzir ortofotos com GSD de 4,31 cm. Na Tabela 1 são apresentados os valores das posições e os erros dos GCPs apropriados.

Tabela 1 – Valores das posições e erros dos GCPs, coletados com GNSS L2, pós-processados com a base RIOB-93911

GCP	Frequência	Posição pós-processada			Desvio padrão da posição			Tempo de aprapr.
		X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	
1	L2	642777,437	8890185,057	176,676	0,161	0,018	0,041	221
2	L2	642663,969	8890559,236	159,471	0,145	0,016	0,051	238
3	L2	644176,457	8890743,365	162,559	0,004	0,005	0,013	265
Média	-	-	-	-	0,103	0,013	0,035	-

Foram identificadas e separadas utilizando o algoritmo Geobia no *software e-Cognition*, 388 projeções das copas de árvores dominantes e codominantes, que foram exportadas para a extensão shapefile (Figura 06).

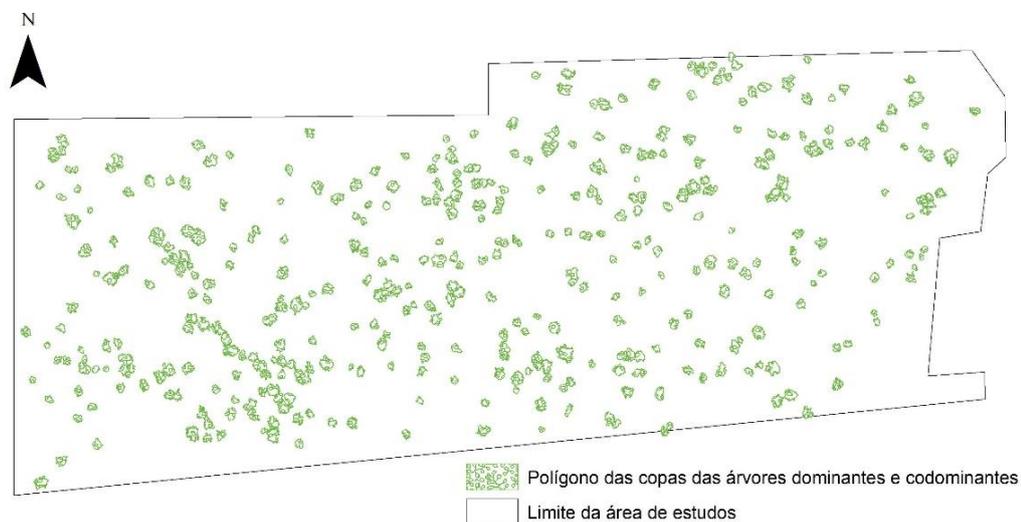


Figura 6. Polígonos das áreas de projeção da copa das árvores dominantes e codominantes, inseridos na área de estudos.

Na análise inicial foi observado as quatro informações morfométricas da copa apresentaram forte correlação com a variável dependente DAP, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de correlações entre as variáveis independentes da morfometria da copa e a variável dependente DAP, das árvores dominantes e codominantes da reserva florestal da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.

	APC	DAP	DGC	DMC	PC
APC		0,882	0,988	0,946	0,844
DAP	0,882		0,885	0,831	0,793
DGC	0,988	0,885		0,950	0,844
DMC	0,946	0,831	0,950		0,844
PC	0,844	0,793	0,844	0,844	

Além de identificar a correlação entre as variáveis, a análise de correlações também permitiu identificar e retirar variáveis que apresentaram multicolineariedade a variável resposta. A eliminação de variáveis multilíneas é um exercício sempre

arriscado, dado que muitas vezes não são claros os limites aceitáveis. Por outro lado, a situação de multicolineariedade não deve ignorar-se, pois os indicadores de qualidade (como R^2) e os testes são afetados, podendo levar a tomar decisões erradas sobre variáveis importantes para o modelo (MATOS, 1995).

Com a combinação das quatro variáveis independentes que apresentaram forte correlação, foram identificados quinze modelos possíveis e, destes, selecionados os doze modelos descritos na Tabela 3.

Na tabela 3, observa-se que os resultados para a estatística $R^2_{ajustado}$ dos modelos corroboram a alta correlação entre as variáveis e indicam que os modelos apresentam um bom ajuste ao banco de dados.

Tabela 3 – Rotina de todos os modelos possíveis, considerando o desenvolvimento de modelos de simples, dupla e tripla entrada

Entradas do modelo	Variáveis incluídas no Modelo	R²%	R²%Ajustado	QME
Simples	A	77,787	77,729	200,35
	B	78,395	78,338	194,88
	C	69,142	69,062	278,33
	D	62,916	62,819	334,5
Dupla	AB	78,606	78,495	193,47
	AD	78,609	78,498	193,44
	BC	78,504	78,392	194,39
Tripla	ABC	78,77	78,603	192,49
	ACD	78,732	78,566	192,83

Em que: **A:** área de projeção da copa (APC); **B:** diâmetro geométrico da copa (DGC); **C:** diâmetro médio da copa (DMC); **D:** perímetro da copa (PC); **R²%:** coeficiente de determinação em porcentagem; **R²%Ajustado:** coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; **QME:** quadrado médio do erro.

Após a identificação de todos os modelos possíveis, iniciou-se a rotina de processamento para obtenção de cada equação correspondente. Os nove modelos apresentaram em média, quinze observações consideradas atípicas e que estavam influenciando a regressão. Essas observações foram identificadas e excluídas do banco de dados. A atipicidade das observações nas variáveis morfométricas da copa pode estar vinculada à existência de árvores com copas quebradas ou incompletas, conforme já observado por Figueiredo (2017) em 3% das amostras de seu estudo. Após essa análise de pontos atípicos, os modelos foram ajustados novamente e resultaram nas equações constantes na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações ajustadas e resultados das rotinas estatísticas

	Equação Ajustada	R²_{Aj.} %	Syx (cm)	Syx %	PRES (cm⁶)
Simples entrada	1 DAP = 36,5784 + 0,178071*APC	82,3	±11,9	13,5	51816,6
	2 DAP = -17,0407 + 5,65471*DGC	81,4	±12,1	13,7	54605,5
	3 DAP = -7,97197 + 5,19589*DMC	74,6	±14,2	16,1	74650,8
	4 DAP = 33,3119 + 0,215719*PC	70,1	±15,2	17,2	85155,9
Dupla entrada	5 DAP = 7,66307 + 0,0826114*APC + 3,04501*DGC	82,1	±12,0	13,6	53647,3
	6 DAP = 7,66307 + 0,0826114*APC + 3,04501*DGC	83,5	±11,6	13,1	49759,8
	7 DAP = -17,1001 + 6,08299*DGC - 0,423891*DMC	81,4	±12,1	13,7	54868,2
Tripla entrada	8 DAP = 10,9754 + 0,0964633*APC + 3,46429*DGC - 0,810334*DMC	82,6	±12,0	13,5	53832,0
	9 DAP = 41,6576 + 0,169311*APC - 0,963895*DMC + 0,0609778*PC	83,2	±11,6	13,2	49803,2

Em que: **DAP:** Diâmetro à altura do peito; **APC:** Área de projeção da copa; **DGC:** Diâmetro geométrico da copa; **DMC:** Diâmetro médio da copa; **PC:** Perímetro da copa; **R²_{Aj.}(%)**: coeficiente de determinação ajustado em percentagem; **Syx (cm)**: erro padrão absoluto; **Syx (%)**: erro padrão percentual; **PRESS:** critério Press (cm⁶).

Todos os nove modelos ajustados geraram equações que apresentaram bons resultados para o coeficiente de determinação (R²_{Ajustado}). As equações de tripla entrada apresentaram melhores resultados, quando comparadas com as de simples e dupla entradas. Porém, é importante ressaltar que, quanto maior o número de entrada de variáveis explicativas, maior é a complexidade de entendimento da equação e mais informações são necessárias para a formação do banco de dados. Portanto, se a diferença da precisão for pequena é preferível selecionar a de menor número de variáveis ou fazer a seleção de uma equação para cada quantidade de entradas.

A variável APC foi a que apresentou maior correlação com o DAP e, em todas os modelos em que ela foi utilizada, as estimativas realizadas pelas equações se apresentaram melhores, indicando que a variável pode ser utilizada sozinha no ajuste de modelos.

A área de projeção da copa remete ao conceito original de dominância, das árvores no ambiente florestal, ou seja, quanto maior a copa das árvores, maior será sua área basal. Assim, uma árvore de grande dimensão de copa apresenta um potencial maior para acumular biomassa. Desta forma, uma copa ampla está relacionada com maiores diâmetros. A exceção a essa regra natural está quando a árvore perde a sua copa ou parte dela ao longo da sua existência. Nesse contexto haverá uma árvore de grande biomassa de fuste, porém com uma copa diminuta.

A pior equação foi a que utilizou apenas a variável PC para a estimativa, que apresentou o menor valor de R^2_{Ajustado} , o maior erro padrão e o maior valor para a estatística PRESS, indicando maior erro de predição. Observa-se ainda que nas equações em que foi utilizada essa variável, as estimativas e resultados estatísticos se apresentaram piores. Considerando que a variável PC foi a variável que teve a menor correlação com o DAP, esse resultado já era esperado pois, em uma floresta adulta, as árvores apresentam copas irregulares, com muitas reentrâncias devido aos eventos sofridos durante seu crescimento, sendo esta uma métrica com muitas variações entre árvores.

Na análise do gráfico de distribuição dos resíduos foi identificado que todas as nove equações ajustadas, independentemente da quantidade de variáveis utilizadas, apresentaram tendência de superestimava para diâmetros até 120 cm e subestimativa para DAP maiores que 120 cm. Essa mesma característica foi observada por Figueiredo (2014), quando utilizou dados da copa obtidos por LiDAR para estimativa do volume do fuste, que sugere então, o ajuste de modelos por classe de diâmetro e por Sanqueta et al. (2014), em sua pesquisa para desenvolvimento de equações para estimativa do diâmetro de copa para Acácia-negra.

Matos (1995) afirma que um dos pressupostos da regressão é que os resíduos devem distribuir-se aleatoriamente em torno de zero, tanto no modelo global como em relação a cada variável. Caso tal não se verifique, será normalmente necessário alterar o modelo, incluindo ou retirando variáveis, ou realizando alguma transformação que adeque melhor o modelo aos dados.

4.1. Melhor equação de simples entrada

O modelo linear de simples entrada que melhor se ajustou aos dados foi a que utiliza a variável área de projeção da copa “APC” para estimar o DAP. A equação gerada pelo modelo ($DAP = 36,5784 + 0,178071*APC$), apresentou melhores resultados em todas as quatro estatísticas consideradas, conforme foi observado na Tabela 4.

Mesmo com os melhores resultados estatísticos, observa-se no gráfico de distribuição dos resíduos da regressão (Figura 7-a), que o modelo apresenta tendência a superestimar o DAP em árvores com diâmetros até 70 cm.

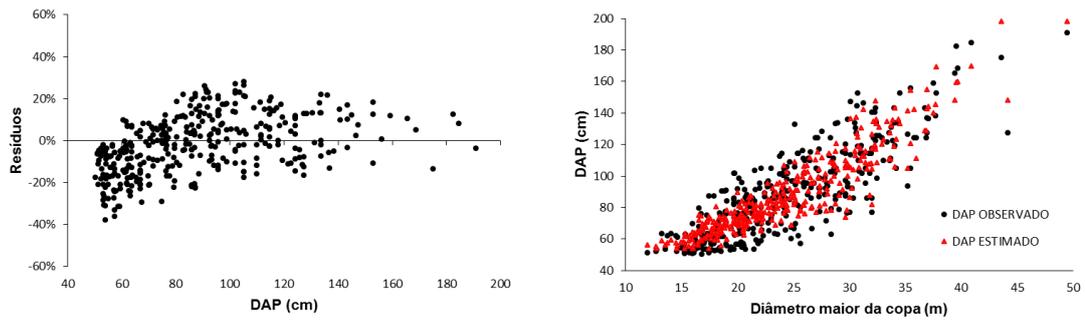


Figura 7. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de simples entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.

4.2. Melhor equação de dupla entrada

A equação $DAP = 33,0298 + 0,141623*APC + 0,0551307*PC$, apresentou os melhores resultados dentre os modelos de dupla entrada (Tabela 4). O gráfico de resíduo percentual apresenta uma pequena tendência de superestimativa para diâmetros inferiores a 70 cm (Figura 8a), o que não impede a recomendação para uso. Sugere-se que sejam ajustados modelos por classe de diâmetros para eliminar essa tendência. Na Figura 8b, quando se observam os DAPs reais e estimados, verifica-se que os valores estimados apresentam uma boa distribuição e proximidade com os valores reais, mostrando a adequabilidade da equação.

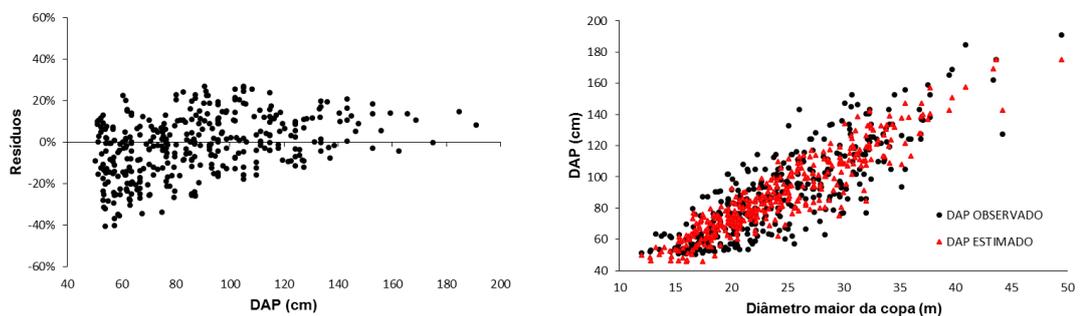


Figura 8. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de simples entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.

4.3. Melhor equação de tripla entrada

Dentre as equações de tripla entrada, a equação $DAP = 41,6576 + 0,169311*APC - 0,963895*DMC + 0,0609778*PC$, foi a selecionada entre os modelos testados. A equação utiliza na sua estimativa as variáveis APC, DMC e PC, sendo que duas variáveis são obtidas de forma automática pelo processamento dos dados morfométricos e uma manualmente por processamento manual.

Assim como nos modelos de simples e dupla entradas, o gráfico de resíduo percentual apresenta uma pequena tendência de superestimativa para diâmetros inferiores a 70 cm (Figura 9a), Na Figura 9b, se observam os DAPs reais e estimados, e o ajuste do modelo, indicando sua possibilidade de uso.

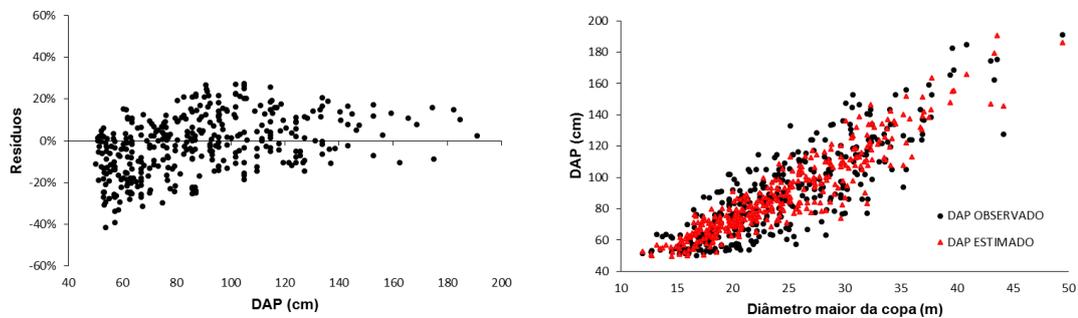


Figura 9. a) Distribuição dos resíduos percentuais da regressão, para o modelo de tripla entrada selecionado; b) DAP real e estimado sobrepostos, demonstrando o ajuste do modelo aos dados.

5 CONCLUSÕES

É possível, por fotogrametria de imagens registradas com UAS, gerar dados da morfometria da copa das árvores dominantes e codominantes de uma floresta nativa, classificada como floresta ombrófila densa.

As variáveis morfométricas da copa, obtidas pela fotogrametria, que apresentaram alta correlação com o diâmetro medido à altura do peito - DAP, medido em inventário florestal censitário, foram a área de projeção da copa (APC), o diâmetro geométrico da copa (DGC), o diâmetro médio da copa (DMC) e o perímetro da copa (PC), permitindo assim, estabelecer por regressão, a relação aritmética entre as variáveis.

Dentre os modelos lineares de equação de simples entrada, o que melhor estimou o diâmetro foi o que utiliza a variável área de projeção da copa (APC), que após os ajustes gerou a equação “ $DAP = 36,5784 + 0,178071*APC$ ”.

O modelo linear de dupla entrada que utiliza as variáveis área de projeção da copa (APC) e perímetro de copa (PC), foi o que apresentou melhores resultados estatísticos após o ajuste aos dados. O modelo gerou a equação “ $DAP = 33,0298 + 0,141623*APC + 0,0551307*PC$ ”.

Já entre os dois modelos que utilizam três variáveis para a estimativa do DAP, o que mais se ajustou aos dados e apresentou melhores resultados estatísticos foi o modelo que utiliza as variáveis área de projeção da copa “APC”, diâmetro médio da copa “DMC” e perímetro da copa “PC”, que gerou a equação $DAP = 41,6576 + 0,169311*APC - 0,963895*DMC + 0,0609778*PC$. Tal modelo utiliza variáveis obtidas de forma automática e manual no processamento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACRE. **Zoneamento ecológico-econômico: recursos naturais e meio ambiente**. Rio Branco: SECTMA, 116 p. 2010.
- BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v.19, n.2, p.97-104, 1973.
- BARUSO, A.P. **A determinação de funções de crescimento mediante análise do tronco**. Curitiba: UFPR, 1977. (Tese não defendida).
- BURGER, H. **Baumkrone und zuwachs in zwei hiebsreifen fichtenbeständen**. **Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen**, 21: 147-176. 1939.
- CALEGARIO, N.; CALEGARIO, C. L. L.; MAESTRI, R.; DANIELS, R. Melhoria da qualidade de ajuste de modelos biométricos florestais pelo emprego da teoria dos modelos não lineares generalizados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p.38-50, dez. 2005.
- CHATTERJEE, S.; HADI, A.S. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. **Statistical Science**, 3(1): 379-416. 1986.
- CUNHA, T. A. da; CAVALLI, J. P.; FINGER, C. A. G. Relação entre alongamento anual da copa e o incremento diamétrico de árvores singulares de *Cedrela fissilis* (Vell). **Ciência Florestal**, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 703-712, dez. 2013.
- DRĂGUȚ, L.; TIEDE, D.; LEVICK, S. R. ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, p. 859-871, 2010.
- DJI. **Phantom 4 Pro**. Disponível em: <<https://www.dji.com/phantom-4-pro/info#specs>>. Acesso em: 4 abr. 2019.
- DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 79-89, dez. 2004.
- FERRAZ, A.S.; SOARES, V.P.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, C.A.A.S.; BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v.21, p.286-296, 2014.
- FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d'. **Manejo de precisão em florestas tropicais: Modelo Digital de Exploração Florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 183 p. 2007.

- FIGUEIREDO, E. O. **Modelagem biométrica para árvores individuais a partir do LIDAR em área de manejo de precisão em florestas tropicais na Amazônia Ocidental**. Manaus: [s.n.], Tese (Doutorado) INPA, Manaus, 2014.
- FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d’; BRAZ, E. M.; PAPA, D. A.; FEARNside, P. M. LIDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 281-293, Dec. 2016.
- FIGUEIREDO, E. O., D’OLIVEIRA, M. V. N., FEARNside, P. M., BRAZ, E. M., PAPA, D. de A. Equations to estimate tree gaps in a precision forest management area the amazon based on crown morphometry. **Rev. Árvore, Viçosa** , v. 41, n. 3, e410313, 2017
- FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. de M.; D’OLIVEIRA, M. V. N.; SANTOS, E. K. M. dos. **Manejo Florestal 4.0: Calendário Preliminar de Inventário Florestal com Aeronaves Remotamente Pilotadas**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2018.
- FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. D. M. **Planos de voo semiautônomos para fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas de classe 3**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 50 p. (Embrapa Acre. Circular técnica, 75). 2018.
- GRAÇA, N.L.S.D.S.; MITISHITA, E. A.; GONÇALVES, J. E. USE OF UAV PLATFORM AS AN AUTONOMOUS TOOL FOR ESTIMATING EXPANSION ON INVADED AGRICULTURAL LAND. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 23, n. 3, p. 509-519, 2017.
- INAMASU, R. Y.; BELLOTE, A. F. J.; LUCHIARI JUNIOR, A.; SHIRATSUCHI, L. S.; ARMANDO, P.; OLIVEIRA, V. DE; BERNARDI, A. C. DE C.; **Portfólio automação agrícola, pecuária e florestal** – São Carlos, SP: Embrapa, 2016.
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas - possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: GTZ, 343p, 1990.
- LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. **Proceedings of the International Conference on Computer Vision**. Vol 2, p. 1150–1157, 1999.
- LOWE, D. G. Distinctive Image Features from ScaleInvariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, vol. 60, n.2, pp 91-110, 2004.

- MATOS, M. A. **Manual operacional para a regressão linear**. Porto, Portugal: Feup, 1995.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. 2018. **ICA 100-40**, reeditada em 20 de novembro de 2018. Dispoe sobre a regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por aeronaves não tripuladas. (www.decea.gov.br) Acesso em: 11.04.2019.
- OLIVEIRA SOBRINHO, M.F.; CORTE, A.P.D.; VASCONCELLOS, B.N.; SANQUETTA, C.R.; REX, F.E. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para mensuração de processos florestais. Centro BIOFIX de Pesquisa em Biomassa e sequestro de carbono. Universidade Federal do Paraná – UFPR. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.27; p.117, 126, jun. 2018.
- PIX4D. **Getting GCPs on the field or through other sources (optional but recommended)**. 2015. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489>>. Acesso em: 5 abr. 2019.
- RYAN, T. P. **Estatística moderna para engenharia**. Elsevier. Rio de Janeiro, 2011.
- ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, 2009.
- SANQUETTA, C. R., BEHLING, A., CORTEAPD, FERNANDES, A. C., BECKERT S. M., SIMON, A. A.. Equações para estimativa do diâmetro de copa para *Acácia-negra*. **Floresta e Ambiente**; 21(2): 192-205. 2014
- SAS INSTITUTE. **SAS User's guide: statistics**. Release 6.03. Cary, 1990. 584p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: parte I: modelos de regressão linear e não linear: parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso da matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 352 p. 2005.
- SOARES P.; FIRMINO P.; TOMÉ M.; CAMPAGNOLO M.; OLIVEIRA J.; OLIVEIRA B.; ARAÚJO J.; CÂMARA F. A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados no inventário florestal – o caso do montado de sobro. Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia-CNCG, 8. Lisboa. **Anais...**Lisboa: VII CNCG, p. 1- 8. 2015.
- SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-SEA, 505 p. 1998.

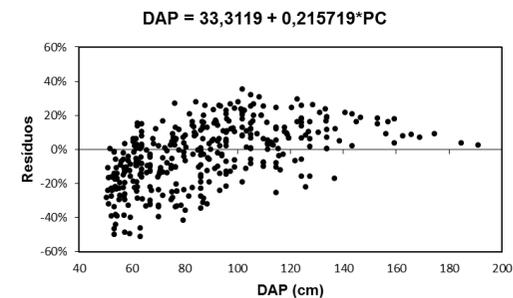
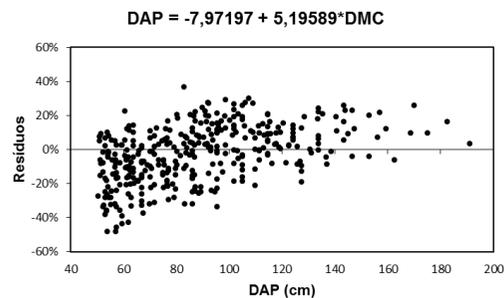
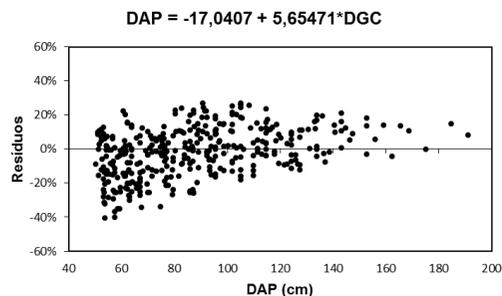
STATGRAPHICS. **Statgraphics Centurion XV**: User's guide. StatPoint Inc. EUA, 299p. 2006.

WINK, C.; MONTEIRO, J.S.; REINERT, D.J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades, **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2012. 40(93): 057-067.

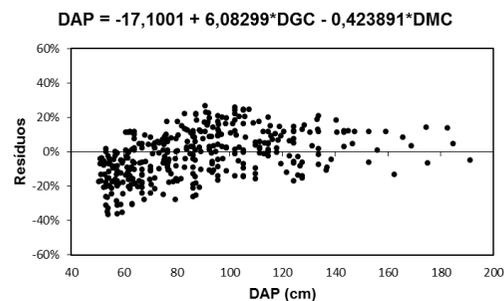
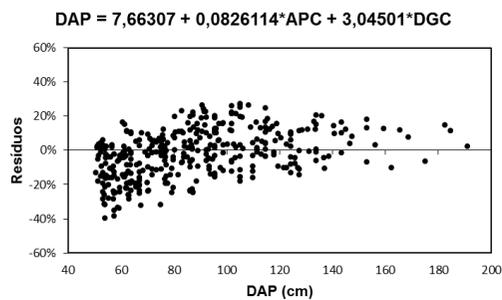
APÊNDICE A

Gráficos de distribuição dos resíduos percentuais, para equações ajustadas de simples, dupla e tripla entradas, que não foram selecionadas como as melhores.

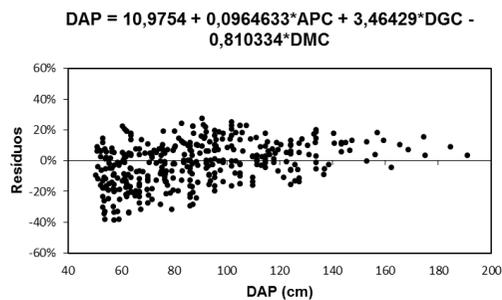
Modelos de simples entrada



Modelos de dupla entrada



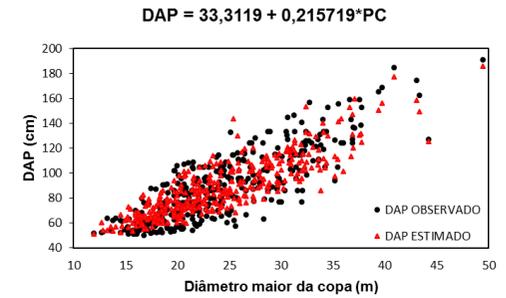
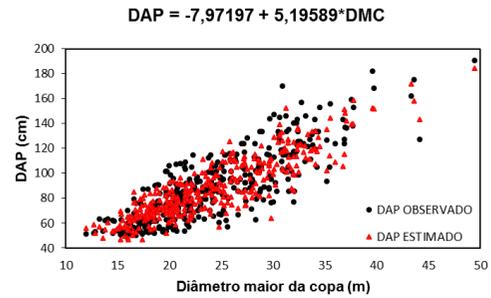
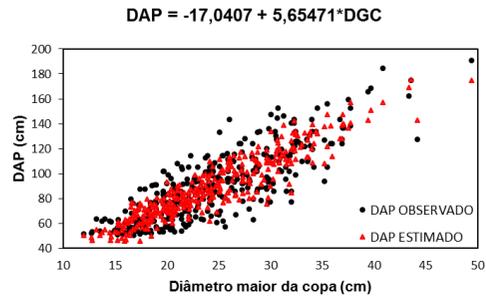
Modelos de tripla entrada



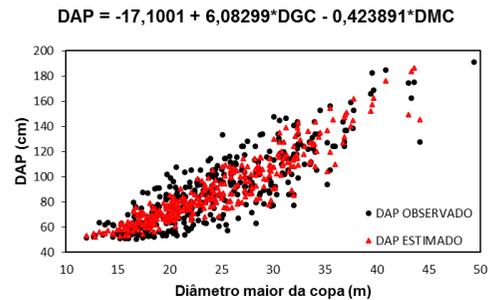
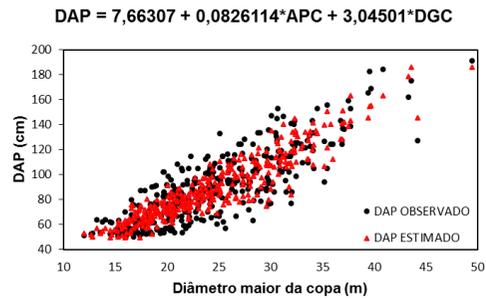
APÊNDICE B

Gráficos de dispersão dos DAPs real e estimado dos modelos não selecionados como melhores.

Modelos de simples entrada



Modelos de dupla entrada



Modelos de tripla entrada

