

Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Acre
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 55

Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)

Evandro Orfanó Figueiredo
Marcus Vinício Neves d'Oliveira
Charton Jahn Locks
Daniel de Almeida Papa

Embrapa Acre
Rio Branco, AC
2016

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Acre

Rodovia BR 364, km 14, sentido Rio Branco/Porto Velho

Caixa Postal 321

CEP 69908-970 Rio Branco, AC

Fone: (68) 3212-3200

Fax: (68) 3212-3284

<http://www.embrapa.br/acre>

<https://www.embrapa.br/fale-conosco>

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José Marques Carneiro Júnior*

Secretária-Executiva: *Claudia Carvalho Sena*

Membros: *Carlos Maurício Soares de Andrade, Celso Luis Bergo, Evandro Orfanó*

Figueiredo, Patricia Silva Flores, Rodrigo Souza Santos, Rogério Resende Martins

Ferreira, Rivaldalve Coelho Gonçalves, Tádário Kamel de Oliveira, Tatiana de Campos

Supervisão editorial: *Claudia Carvalho Sena / Suely Moreira de Melo*

Revisão de texto: *Claudia Carvalho Sena / Suely Moreira de Melo*

Normalização bibliográfica: *Renata do Carmo França Seabra*

Editoração eletrônica: *Jefferson Marcks Ribeiro de Lima*

Foto da capa: *Evandro Orfanó Figueiredo*

1ª edição

1ª impressão (2016): 500 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Acre

Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras RGB instaladas em aeronaves remotamente pilotadas (ARP) / Evandro Orfanó Figueiredo... [et al.]. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2016.

39 p.: il. color. – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Acre, ISSN 0101-5516; 55).

1. Fotogrametria digital. 2. Modelagem 3D. 3. Biometria florestal. 4. Drone. I. Figueiredo, Evandro Orfanó. II. Embrapa Acre. III. Série.

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e métodos	10
Resultados e discussão	17
Validação dos resultados	32
Conclusões	35
Referências	36

Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)

Evandro Orfanó Figueiredo¹

Marcus Vinício Neves d'Oliveira²

Charton Jahn Locks³

Daniel de Almeida Papa⁴

Resumo

A utilização de câmeras fotográficas acopladas a aeronaves remotamente pilotadas (ARP) na engenharia consiste em uma alternativa de baixo custo para o mapeamento e modelagem 3D por meio de nuvens de pontos produzidas pelo processamento estereoscópico das ortofotos obtidas durante o voo. O objetivo deste trabalho foi avaliar e selecionar uma estratégia de plano de voo semiautônomo para fotogrametria usando uma câmera RGB acoplada a um ARP multirrotor (classe III), cujo produto é a obtenção de nuvens de pontos de alta densidade, visando à estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras. Foi testada a acurácia das estimativas de volume de 12 pilhas de toras de madeira, produzidas pelo processamento da nuvem de pontos de imagens obtidas em três diferentes altitudes (30, 40 e 50 metros) e *overlap* lateral de 80% a 90%, com o volume das pilhas medido em campo. Os contrastes das médias dos tratamentos foram submetidos ao teste

¹Engenheiro-agrônomo, doutor em Manejo Florestal, pesquisador da Embrapa Acre, Rio Branco, AC.

²Engenheiro florestal, Ph.D. em Manejo Florestal, pesquisador da Embrapa Acre, Rio Branco, AC.

³Engenheiro ambiental, analista ambiental do Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal, Serviço Florestal Brasileiro, Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, Brasília, DF.

⁴Engenheiro florestal, especialista em Manejo de Florestas Nativas, analista da Embrapa Acre, Rio Branco, AC.

de Tukey (5%). Os erros de estimativa volumétrica dos três planos de voo oscilaram de 0,58% a 19,63%. Não houve diferença significativa entre os planos de voo de 30 e 40 metros, cujo erro médio por pilha de toras foi de 0,39 m³. Voos acima de 40 metros podem ser empregados desde que se eleve o *overlap* lateral e longitudinal para valores próximos de 90%.

Palavras-chave: UAV, drone, biometria florestal, fator de empilhamento, manejo florestal, Amazônia, fotogrametria digital.

Timber Volume Estimates in Forest Log Landings Through RGB Cameras on Board of Remotely Piloted Aircraft (RPA)

Abstract

The use of regular optical cameras coupled to unmanned aerial vehicles in engineering consists in a low cost alternative to 3D mapping and modelling through the processing of the cloud points produced by the stereoscopic processing of orthophotos obtained during the flight. The objective of this work was to assess and select the better semi-autonomous flight plan strategy for photogrammetry using a RGB camera coupled to a multi-rotor (Class III) UAV, which output is a high density points cloud used to timber volume estimation of logs stacks in forest log landings. The accuracy of 12 stacks volume estimation produced by the processing of point clouds produced by the processing of images taken from three different altitudes (30, 40 and 50 m) and 80% to 90% side overlap and the stacks volume estimated on the ground. The Tukey (5 %) test was applied to the treatments means contrasts. The mean standard error of the three flights varied from 0.58% to 19.63%. No significant differences were observed between the 30 and 40 m flights which standard error by stacks was 0.39 m³ (Tukey test, $p < 0,05$). Flights over 40 m can be use since the side overlap is raised to around 90%.

Keywords: UAV, drone, volume estimates, forest biometrics, stacking factor, forest management, Amazon, digital photogrammetry.

Introdução

A mensuração do estoque de toras nos pátios das indústrias madeireiras na Amazônia consiste em uma operação de rotina para gestão da serraria e auxilia o planejamento da comercialização das futuras entregas no mercado consumidor. Além disso, trata-se de uma rotina operacional de fiscalização realizada periodicamente pelos órgãos de controle ambiental, os quais são responsáveis pelo licenciamento e fiscalização dos planos de manejo florestal.

As informações sobre o número de serrarias em funcionamento na Amazônia são controversas e desatualizadas, visto ser de conhecimento público o grande número de estabelecimentos industriais madeireiros clandestinos (FERRARI, 2013). Segundo o Imazon (2009), o número de indústrias madeireiras nos nove estados da região superava 2 mil estabelecimentos.

Para gerenciar e monitorar as indústrias licenciadas e fiscalizar e autuar as clandestinas, seria necessário centenas de técnicos dedicados exclusivamente a medir e estimar o volume de toras estocadas nos pátios, além de um grande esforço de escritório para gerar a compatibilidade contábil entre o volume estocado e o licenciado.

Alternativas geotecnológicas encontram-se disponíveis, a exemplo do Lidar de solo (*Light Detection and Ranging*) e da fotogrametria tradicional. No entanto, o custo dessas alternativas supera as cifras de US\$ 200 mil por unidade operacional (Lidar e software).

A fotogrametria com micro RPA/ARP (aeronaves remotamente pilotadas) surge como uma alternativa viável para uso em distintas aplicações da engenharia florestal. Uma delas é a estimativa volumétrica de toras em pátios industriais e florestais.

Essas pequenas aeronaves também são conhecidas por diferentes nomes. O mais popular é a terminologia drone, nomenclatura usada para multirrotores, a qual não apresenta fundamentação técnica. Já as siglas RPA/ARP surgiram no Brasil com a iniciativa da Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) de regulamentar o uso dessas ferramentas (MUNARETTO, 2015).

A Anac (2015) propõe a divisão dos RPAs em três classes distintas: classe I para RPAs maiores que 150 quilos; classe II para RPAs entre 25 e 150 quilos; e classe III para RPAs menores que 25 quilos.

A popularização dos RPAs ocorre no Brasil a partir dos equipamentos da classe III (os microdrones), principalmente, em decorrência do menor preço de mercado e da alta tecnologia embarcada.

O objetivo deste estudo foi avaliar e selecionar uma estratégia de plano de voo semiautônomo para fotogrametria usando um RPA multirrotor (classe III), cujo produto é a obtenção de nuvens de pontos de alta densidade, visando à estimativa volumétrica de toras estocadas na indústria madeireira.

Material e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

Os estudos foram realizados no pátio de estocagem de toras da indústria Acre Madeiras Ltda., localizada no Distrito Industrial de Rio Branco, Acre. O local de estocagem das toras apresenta 13.650 m² (65 m x 210 m) (Figura 1), com distância de 21 km do aeroporto homologado mais próximo.

Na região do entorno do pátio, existem rede elétrica industrial e torres de telefonia, as quais ficaram fora da linha de voo do RPA.

As pilhas de toras mensuradas são originárias de um plano de manejo florestal localizado no Município de Bujari, AC, o qual foi licenciado pelo Instituto de Meio Ambiente do Acre (Imac), sob o protocolo 161/05 e anotação de responsabilidade técnica AC20150001484.

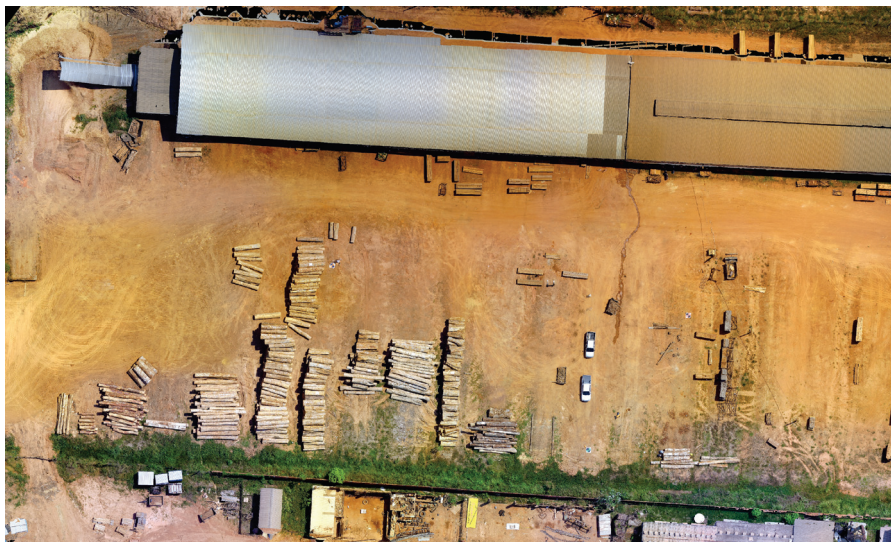


Foto: Evandro Orfanó Figueiredo

Figura 1. Composição RGB da ortofoto da área do pátio de estocagem de toras da indústria Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Aeronave remotamente pilotada (RPA/ARP) utilizada

A escolha do RPA foi feita em função da popularidade do modelo de multirrotor *DJI Phantom 3 Professional* (P3P) e da possibilidade de planos de voos semiautônomos. Esse equipamento apresenta menor preço de aquisição e alta tecnologia embarcada.

O drone DJI P3P apresenta sensores eletrônicos de bússola, acelerômetro com controladora eletrônica de velocidade, giroscópio de seis eixos e sistema GNSS (GPS e Glonass) de alta sensibilidade. É equipado com câmera RGB Sony EXMOR de 12,4 megapixel de 20 mm (formato equivalente 35 mm) acoplada a um gimbal de três eixos para estabilização eletrônica (DJI, 2015).

A estação de solo utilizada tem frequência de 2.400 GHz e é equipada com a tecnologia *Lightbridge* que permite voos sem interferência de até 3.500 metros de distância horizontal. Para operação da estação de solo foi utilizado um *tablet* com processador Octa Core, com 16 GB e sistema operacional Android.

Aplicativos, softwares e hardware

O aplicativo *PIX4D Capture* foi utilizado para executar o plano de voo na estação de solo, com a seguinte configuração básica: unidade métrica, modo avançado e modo de aceleração habilitado. Também foi ajustado o ângulo da câmera em Nadir e optou-se pela velocidade máxima operacional do RPA. As demais configurações foram estabelecidas no plano de voo.

O processamento das imagens com *geotags* foi feito no software *PIX4D Mapper* versão 2.0.83. O hardware empregado para processamento foi um *notebook* com processador Intel(R) Core(TM) i7-4710MQ, CPU 2.50GHz, memória RAM de 32 GB e dupla placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 970M de 8 GB.

Planos de voo

Foram realizados e executados três planos de voo distintos sobre a área de interesse (Tabela 1). Para os cálculos dos parâmetros do voo semiautônomo foram consideradas as seguintes especificações técnicas da câmera: posição Nadir; 6,317 mm para a largura horizontal do sensor (*Sw*); 3,651 mm para o comprimento focal (*Fr*); e 4.000 pixels para a largura da imagem (*imW*).

A aeronave também foi configurada para que os ganhos de *pitch* (rotação em relação ao eixo vertical), *roll* (rotação em relação ao eixo da frente) e *yaw* (rotação lateral) não fossem superiores a duas vezes o valor da última leitura registrada na IMU (*Inertial Measurement Unit*), cujo objetivo é simplificar o pós-processamento de ortorretificação.

Tabela 1. Parâmetros de planejamento de voo para coleta de dados por fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas, visando estimar a volumetria de toras estocadas em pátio, Rio Branco, Acre, 2015.

Altura de voo (m)	Cobertura horizontal (m)	Cobertura vertical (m)	Área de cobertura da foto (m ²)	GSD (cm/pixel)	Distância entre linhas (m)	Overlap lateral
30	51,90	38,93	2020,21	1,30	9,63	81,4%
40	69,20	51,90	3591,49	1,73	13,10	81,1%
50	86,50	64,88	5611,70	2,16	15,60	82,0%

GSD: *Ground Sampling Distance*; *Overlap lateral*: percentual de sobreposição das imagens aéreas obtidas em linhas paralelas de voo.

Durante a realização da missão de voo foram posicionados no pátio madeireiro três alvos (vermelho, amarelo e verde) para ser utilizados como pontos de controle no solo. A apropriação das coordenadas dos alvos foi obtida por GPS L2 com tempo de aquisição de uma hora e tendo 6.600 m de distância da estação de referência RIOB 93911 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS.

Uma vez concluída as três missões de voo na área do pátio madeireiro, o passo seguinte foi processar separadamente o conjunto de imagens dos voos.

Pontos de controle (*Ground Control Points – GCP*)

Os pontos de controle são objetos, características ou alvos facilmente identificados nas imagens aéreas (AMORIN, 2004; BETHEL et al., 2001; GROETELAARS) que, posteriormente, serão referenciados com um sistema de coordenadas no solo, por meio de receptor GNSS.

Quanto maior a precisão desejada nas medidas da fotogrametria, maiores também serão os cuidados na adequada seleção dos locais de posicionamento dos GCPs e mais extenso será o tempo de apropriação das coordenadas geográficas dos pontos de controle.

Os pontos de controle deste trabalho foram três alvos de 1 metro quadrado (Figura 2) distribuídos no terreno de maneira a formar um triângulo, e as pilhas de toras a serem mensuradas estavam no interior desse triângulo.

Foto: Evandro Orfanó Figueiredo



Figura 2. Imagem aérea obtida com RPA/ARP durante a realização dos três planos de voo avaliados (30, 40 e 50 metros de altura) com detalhe de um dos alvos posicionados na área do pátio madeireiro, Distrito Industrial, Rio Branco, Acre, 2015.

Os três alvos (vermelho, laranja e verde) foram apropriados com GNSS L2 e com 60 minutos para fixação da coordenada. Posteriormente, foram pós-processados no *datum* vertical (EGM92) e *datum* horizontal *World Geodetic System 84* (WGS84). A diferença entre os *data* verticais *Earth Gravitational Model 96* (EGM96) e Imbituba foi extraída no processamento do software *PIX4D Mapper*. O modelo de projeção foi *Universal Transverse Mercator* (UTM 19S) e a base de referência foi a estação RIOB 93911 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS.

Fator de empilhamento de toras

O fator de empilhamento de toras tem o objetivo de converter o volume de madeira empilhada em volume sólido. No entanto, características como os diâmetros e comprimentos das toras de madeira, a espessura da casca, a forma de empilhar, as espécies, dentre outros fatores, afetam o volume de madeira empilhada, acarretando erros (BERTOLA et al., 2003).

Para a realização deste estudo, cada pilha foi formada por toras da mesma espécie e com padrões dendrométricos do fuste similares, distinguindo-se as pilhas com toras cilíndricas e aquelas com deformações de base devido à presença de restos de sapopema.

Visando minimizar os erros do fator de empilhamento (FE), os valores foram estimados com a obtenção de seis imagens (fotos) de 20 megapixels de cada pilha de madeira analisada. As fotos foram tomadas a 3 metros de distância da pilha, enquanto os espaços ocupados pelas faces das toras e os vazios entre elas foram vetorizados em software SIG (Sistema de Informações Geográficas). O resultado médio das seis imagens de cada pilha de toras forneceu o fator de empilhamento individualizado.

Em sequência, as toras das 12 pilhas analisadas foram mensuradas pelos diâmetros cruzados de cada extremidade e seu comprimento, obtendo-se assim o volume de cada tora e, conseqüentemente, o fator de empilhamento de forma individualizada para cada pilha. O procedimento adotado foi o mesmo empregado pelos órgãos de controle ambiental durante as vistorias de campo e esteve de acordo com a Instrução Normativa do Ibama nº 10, de 8 de maio de 2015, que estabelece procedimentos para a organização física de produtos florestais madeireiros em áreas de exploração florestal e em estabelecimentos industriais, comerciais ou consumidores de recursos florestais (IBAMA, 2015).

Processamento da fotogrametria

O conjunto de imagens adquiridas em cada missão de voo foi processado no software *PIX4D Mapper* com os seguintes parâmetros comuns:

- a) Processamento completo para obtenção dos *keypoints*.
- b) Emparelhamento de imagem para grades de voo geometricamente verificado.
- c) Seleção padrão de *keypoints*.
- d) Calibração das imagens no método padrão com os principais parâmetros internos e todos os externos.
- e) Reemparelhamento automático.
- f) Densificação da nuvem de pontos com escala de imagem de uma resolução no modo múltipla escala (de 1 a 1/8 de resolução).
- g) Densidade de pontos otimizada com reprojeção mínima em três fotos.
- h) Filtro de nuvem de pontos para processamento dentro da área de interesse (pátio florestal).
- i) Classificação da nuvem de pontos com comprimento mínimo esperado de 0,2 m (para resíduos no pátio), comprimento máximo esperado de 400 m (para o galpão industrial presente no local) e altura mínima dos objetos de 0,1 m (para resíduos).
- j) Resolução espacial automática para a ortofoto, de acordo com o GSD.

O *PIX4D Mapper* emprega um algoritmo muito similar ao procedimento SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) (LOWE, 2004). O SIFT é um método de extração de características invariantes à

escala e rotação (*pitch*, *yaw* e *roll*) em imagens digitais (LOWE 1999; TSAY; LEE, 2012), no caso em questão de imagens aéreas. A solução do algoritmo permite selecionar rapidamente pontos-chaves ou *keypoints* e descarta os pontos nas imagens que não se enquadram no critério de invariância local da escala (LOWE, 2004; SE et al., 2001).

Determinados e reconhecidos os pontos-chaves e seus descritores, inicia-se o processo de *matching* ou coincidência entre imagens vizinhas obtidas em momentos consecutivos de voo e em linhas paralelas no caso do voo autônomo. A partir de então se formaram os pares estereoscópicos para construção do ambiente 3D.

Análise estatística

Foram testados três planos de voo (nas altitudes de 30 m, 40 m e 50 m) com *overlap* lateral entre 81,1% e 82% (Tabela 1).

Para cada missão foram obtidas ortofotos e nuvem de pontos padrão arquivo LAS 1.2. O cálculo de cada pilha de madeira foi realizado com o algoritmo de volumetria (Pix4D 2015) do software *PIX4D Mapper* sobre a nuvem de pontos de cada pilha e multiplicado pelo fator de empilhamento individual de cada conjunto de toras.

Os valores volumétricos obtidos digitalmente para cada pilha nos três planos de voo foram contrastados com os volumes obtidos em campo e os erros apreciados em Anova (SAS, 1990). As médias de cada tratamento foram comparadas pelo teste de Tukey (com 5% de significância) (STATGRAPHICS, 2006).

Resultados e discussão

Fator de empilhamento

O fator de empilhamento é o instrumento que permite estimar o volume de toras estocado em cada pilha no pátio madeireiro. Quando

se constrói uma nuvem de pontos a partir de pares de estereoscópicos tem-se o contorno do objeto de interesse que se pretende mensurar. A nuvem de pontos nesse caso funciona como um manto que recobre todo o detalhamento da superfície, porém os espaços vazios entre uma tora e outra acabam compondo o volume final a ser estimado pela nuvem de pontos. Assim, a técnica do fator de empilhamento se aplica perfeitamente para a situação de fotogrametria com RPA/ARP.

O fator de empilhamento para este estudo foi obtido por digitalização de fotografias digitais realizadas em software de geoprocessamento. A vetorização das faces de cada tora nas imagens digitais (Figura 3) permite estimar qual o percentual de espaços vazios em cada fotografia e replicar o valor médio (seis imagens vetorizadas por pilha) para o monte de madeira avaliada.

Fotos: Evandro O. Figueiredo

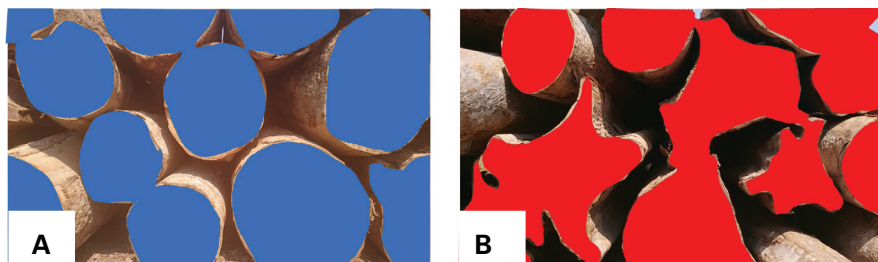


Figura 3. Vetorização das faces das toras nas imagens digitais para obtenção do fator de empilhamento: A) pilha de toras com tendência de forma cilíndrica; B) pilha de toras com restos de sapopemas, Rio Branco, Acre, 2015.

Os valores obtidos para as 12 pilhas de madeira (Tabela 2) são compatíveis aos de Bertola et al. (2003); Couto e Bastos (1998), Scolforo et al. (2004) e Silva et al. (2005).

A presença de toras irregulares na forma da pilha acarreta um fator de empilhamento maior, conforme já havia revelado Scolforo et al. (2004) ao calcular o fator de empilhamento de fustes de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) cuja forma do tronco é bastante irregular, alcançando um fator de empilhamento médio superior a 1,9.

Tabela 2. Forma das toras nas pilhas, percentual de face de toras, espaços vazios e fator de empilhamento, Rio Branco, Acre, 2015.

Identificação	Forma das toras	Percentual das faces das toras na imagem (PF)	Percentual de espaços vazios (PE)	Fator de empilhamento (FE)
Pilha 1	Cilíndrica	71,75%	28,25%	1,3938
Pilha 2	Cilíndrica	70,07%	29,93%	1,4271
Pilha 3	Irregular	58,89%	41,11%	1,6980
Pilha 4	Irregular	59,54%	40,46%	1,6796
Pilha 5	Irregular	54,52%	45,48%	1,8343
Pilha 6	Irregular	62,84%	37,16%	1,5912
Pilha 7	Cilíndrica	69,03%	30,97%	1,4486
Pilha 8	Irregular	67,36%	32,64%	1,4846
Pilha 9	Cilíndrica	75,25%	24,75%	1,3289
Pilha 10	Cilíndrica	77,28%	22,72%	1,2941
Pilha 11	Cilíndrica	72,68%	27,32%	1,3760
Pilha 12	Cilíndrica	78,03%	21,97%	1,2816

Para a avaliação em questão as pilhas com predominância de toras de formato cilíndrico apresentaram fator de empilhamento (FE) médio de 1,37849 ($\pm 0,0292428$) e para as pilhas de toras irregulares o valor médio foi de 1,65755 ($\pm 0,0581638$). O fato das pilhas estarem organizadas por espécie e pela forma das toras favoreceu a estimativa do cálculo do FE, ressaltando que nem sempre essa é uma realidade nas indústrias madeireiras na Amazônia, apesar de previsto em norma.

Pontos de controle (*Ground Control Points – GCP*)

Os resultados do pós-processamento dos pontos de controle podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Erro médio do pós-processamento dos pontos de controle (GCP) e estimativa de projeção do erro em pixel nas ortofotos e imagens aéreas registradas, Rio Branco, Acre, 2015.

Nome do GCP	Erro X (m)	Erro Y (m)	Erro Z (m)	Projeção do erro (pixel)	Imagens registradas
Vermelho	0,035	-0,055	0,000	1,138	18
Laranja	-0,031	-0,021	-0,004	1,377	15
Verde	-0,007	0,076	0,000	0,873	15
Média (m)	-0,00089	0,000134	-0,001026		
Erro padrão (m)	0,026956	0,055474	0,0021130		

Apesar da boa precisão das coordenadas dos alvos, pode-se verificar que o erro médio do alvo vermelho foi de 5 cm para Y e 3,5' para X, gerando um erro de projeção de 1,138 pixel, sendo maior que a resolução máxima da imagem. Isso acaba interferindo negativamente no resultado da estimativa da volumetria.

Quando ocorrem erros de geolocalização maiores que 2,5 vezes o valor do GSD, há duas alternativas para minimizar os erros de geolocalização: a) aumentar o tempo de apropriação da coordenada; b) elevar o número de alvos dos GCP e descartar aqueles com erros acima da resolução espacial pretendida (2,5 X *Ground Sampling Distance* – GSD).

Como se pretende obter uma estimativa volumétrica de toras empilhadas é importante que as coordenadas apropriadas nos GCP sejam sempre inferiores à resolução do GSD, caso contrário, a apropriação da coordenada poderá embutir um erro a mais, distorcendo a base de dados original obtida com a aeronave (RPA/ARP). Isso ocorreu nos testes prévios para realização do experimento, em que se usou um GNSS L1. Os erros decimétricos do pós-processamento L1 foram muito maiores que a resolução espacial do GSD, causando distorção na nuvem de pontos e, conseqüentemente, inviabilizando as estimativas do volume das pilhas de toras.

Portanto, caso não seja possível usar um GNSS L2, deve-se manter a base de dados original e estimar o volume sem os pontos de controle no solo, visto que os dados coletados com o ARP já apresentam geolocalização.

Planos de voo e obtenção da nuvem de pontos

A definição dos parâmetros técnicos do plano de voo é o princípio para o sucesso da construção dos modelos estereoscópicos. A pergunta inicial que se faz é: Qual o GSD (*Ground Sampling Distance*) necessário para se obter uma estimativa precisa dos volumes das toras na nuvem de pontos ou no modelo digital de superfície (MDS)?

O GSD significa quanto em centímetros um pixel da imagem aérea irá representar no solo (BETHEL et al., 2001). Se o projeto fotogramétrico for para mensurar grandes áreas (estradas, pastagens, etc.) ou objetos (edifícios, galpões, etc.), provavelmente, um GSD de até 10 cm será suficiente. No entanto, se o interesse for mensurar o volume de objetos menores que um metro (em uma das faces) será satisfatório que o GSD tenha valores menores que 1 polegada, ou seja, o plano de voo deve ser realizado de acordo com o interesse de observação.

Previamente à realização do voo deve-se calcular o GSD, observando: a) largura do sensor da câmera fotográfica em milímetros (SW); b) comprimento focal da câmera em milímetros (Fr); c) largura da imagem em pixel (imW); d) altura de voo (H) (Pix4D, 2015).

Como o experimento foi desenvolvido para uma aeronave (RPA/ARP) com configuração fixa de câmera, a variação avaliada no experimento foi a altura de voo (H) com *overlap* lateral superior a 80% (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetro para definição do plano de voo semiautônomo do ARP para três distintos GSD visando à construção de nuvem de pontos estereoscópica para mensuração de toras empilhadas, Rio Branco, Acre, 2015.

Largura do sensor – SW (mm)	Comp. focal – Fr (mm)	Largura da imagem – imW (pixel)	Altura da imagem (pixel)	Altura de voo – H (m)	Cobertura horizontal (m)	Cobertura vertical (m)	Área de cobertura da foto (m ²)	GSD (cm/pixel)	Distância entre linhas de voo	Overlap lateral %
6,317	3,65144	4000	3000	30	51,90	38,93	2020,21	1,30	9,63	81,45%
6,317	3,65144	4000	3000	40	69,20	51,90	3591,49	1,73	13,1	81,07%
6,317	3,65144	4000	3000	50	86,50	64,88	5611,70	2,16	15,6	81,97%

O planejamento e execução de planos de voo mais baixos geram um menor GSD o que é desejável para o cálculo de volume de objetos pequenos, porém, existem dois inconvenientes importantes (KÜNG et al., 2011; ZUFFEREY et al., 2010). O primeiro está relacionado à segurança da missão de voo. Alturas abaixo de 30 metros podem não retirar da linha de voo objetos como árvores, linhas de transmissão de energia, torres, chaminés entre outros obstáculos. O segundo aspecto está vinculado ao custo operacional de processamento. Caso seja planejada uma missão de voo de 10 metros de altura e resguardados os aspectos de segurança, o GSD seria aproximadamente de 0,4 cm, porém haveria necessidade de milhares de imagens o que implicaria em muitas horas para o processamento de dados.

Portanto, a seleção de três alturas oscilando entre 30 e 50 metros possibilita manter os fundamentos do voo seguro, diminuir os custos operacionais de processamento e conservar a precisão dos modelos 3D.

Outras combinações de parâmetros de voo poderiam ser testadas, a exemplo do ângulo da câmera em relação ao solo. Ângulos menores que 70 graus permitiriam avaliar melhor o diâmetro das toras na pilha, bem como fazer a contagem. No entanto, esse não foi objeto de interesse.

Ao todo foram obtidas 748 imagens aéreas divididas conforme Tabela 5. A área em que estavam localizadas as pilhas de toras corresponde a 0,6191 hectare, porém todo o plano de voo deve sempre ser delineado para uma área maior e que extrapole os limites da região de interesse, visto que nas bordaduras dos modelos de nuvem de pontos ou nas ortofotos sempre ocorrem distorções, por não existir o par estereoscópico lateral ou frontal.

O GSD alcançado após o processamento foi sempre menor que o parâmetro inicialmente estimado, indicando que o planejamento inicial da missão de voo foi adequado.

Tabela 5. Resultados de desempenho do processamento das imagens aéreas para obtenção da nuvem de pontos e ortofoto, Rio Branco, Acre, 2015.

Altura de voo (m)	Número de imagem	Área coberta (ha)	GSD estimado (cm/pixel)	GSD obtido (cm/pixel)	Overlap lateral %	Tempo total de processamento*	Tempo de processamento/hectare*
30	228	2,3950	1,30	1,16	81,45%	3h06m37s	1h17m55s
40	267	4,5558	1,73	1,63	81,07%	3h16m53s	43m13s
50	253	6,3018	2,16	2,07	81,97%	2h59m44s	28m31s

*Os dados foram processados em um notebook com CPU Intel(R) Core(TM) i7-4710MQ de 2.50GHz, memória RAM de 32 GB, dupla placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 970M de 8 GB DDR5, 2 SSHD de 1TB e 1 SSD de 250 GB.

O tempo de processamento é sempre mais oneroso quando se diminui o GSD ou quando se aumenta o *overlap* lateral (entre linhas de voo paralelas) ou longitudinal (em imagem na mesma linha de voo). O tempo de processamento por unidade de área mapeada é inversamente proporcional à altura de voo. Quando se eleva a altura de voo, o valor obtido no GSD aumenta e a velocidade de processamento por hectare diminui.

Durante a etapa de processamento inicial manteve-se a opção de extrair os *keypoints* das imagens aéreas em sua máxima resolução, possibilitando obter uma média de *keypoints* coincidentes relativamente alta por imagem (Tabela 6). Os *keypoints* ou pontos-chaves são locais coincidentes facilmente identificados em uma imagem aérea e inalterados na oscilação da escala e rotação. Além disso, possibilitam, em um processo seguinte, formar o par estereoscópico para visualização do ambiente tridimensional (BROW; LOWE, 2007; LOWE, 2004).

Um número elevado de *keypoints* correspondentes permite gerar uma densificação da nuvem de pontos (.las) com alta densidade por metro quadrado e uma grande riqueza de detalhes (BICEGO et al., 2006; WESTOBY et al., 2012). Porém, os fatores que são determinantes para elevar a média de *keypoints* são: a) resolução da imagem (pixel x pixel); b) a intensidade do *overlap*; c) as características do objeto a ser mapeado (LEMES NETO, 2014). Superfícies mapeadas com muitas arestas, contornos, linhas e formatos diversos que permitem ser identificados nas imagens aéreas resultam em muitos *keypoints*.

Portanto, quando maior o número de *keypoints* correspondentes, melhor será o resultado da modelagem 3D do projeto fotogramétrico. Ambientes de superfícies homogêneas, como campo cultivado sem movimentação de máquinas ou lâminas d'água (lagos, açudes, reservatórios, etc.), apresentam uma superfície que impossibilita a localização de *keypoints* correspondentes em imagens aéreas sucessivas (SE et al., 2002), podendo inviabilizar a construção da nuvem de pontos, MDS ou ortofoto (ROMERO et al., 2015).

Tabela 6. Número de *keypoints* por imagem, conforme altura de voo (30, 40 e 50 metros), e os valores mínimo, médio e máximo número de *keypoints* e *keypoints matching*, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Entre número de imagens aéreas	Voo de 30 metros	Voo de 40 metros	Voo de 50 metros
2	533494	160605	438875
3	154964	89875	145663
4	86430	59031	80020
5	52201	40328	51843
6	33234	26172	36565
7	23098	19639	25408
8	17533	15801	18734
9	13799	13002	14902
10	10707	10821	12332
11	8177	8692	10184
12	6772	6616	8911
13	5718	5192	7278
14	4938	4553	5715
15	4136	4009	4766
n-1
Mínimo de <i>keypoints</i> por imagem	20442	16001	18382
Máximo de <i>keypoints</i> por imagem	68679	41822	40297
Média de <i>keypoints</i> por imagem	37544	26526	26053
Mínimo de <i>keypoints matching</i> / imagem	6211	4322	3819
Máximo de <i>keypoints matching</i> / imagem	25991	23095	23889
Média de <i>keypoints matching</i> /imagem	15766	14771	15147

A etapa final foi a densificação da nuvem de pontos a partir dos processos anteriores de obtenção de *keypoints* e *keypoints matching*. Com a finalidade de depurar os contornos de toras e pilhas de madeira foi selecionada a opção de processamento o qual estabeleceu número mínimo de imagens para correspondência entre os pontos 3D a serem densificados. Assim, pares estereoscópicos simples foram descartados. A janela de processamento de verificação desses pontos

foi de 7 x 7 pixels. Como esse processamento foi padrão para as três alturas de voo os resultados da densificação da nuvem de pontos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados da densificação da nuvem de pontos do pátio de estocagem de toras nos três planos de voo, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Descrição	Voo de 30 metros	Voo de 40 metros	Voo de 50 metros
Número de pontos total na nuvem	24.804.933	27.430.078	24.542.059
Número de arquivos formato (.las) gerados	12	6	12
Média de densidade (pontos/m ²)	2.562,25	1.310,58	630,97

A densidade de pontos/m² na nuvem do plano de voo de 30 metros foi tão alta que a visualização da nuvem se assemelha a uma fotografia real tirada em perspectiva da área do pátio madeireiro (Figura 4A). A referida densidade de pontos significa que a cada unidade de área de 2 x 2 centímetros haverá uma coordenada geográfica (XYZ) representando o espaço mapeado.

Já para a nuvem de pontos obtida no voo de 50 metros (Figura 4B), não se obteve o mesmo detalhamento da nuvem de 30 metros e ainda se observa uma grande quantidade de ruídos e falhas de preenchimento da superfície mapeada. Essa resolução indica que existe uma coordenada XYZ a cada 4 x 4 centímetros. Apesar de se tratar de uma excelente resolução, o voo de 50 metros gera uma densidade de pontos quatro vezes menor que o voo de 30 metros, o que refletirá na estimativa volumétrica final das pilhas.



Figura 4. Nuvem de pontos obtida a partir dos voos com o RPA/ARP DJI Phantom 3 Professional: A) nuvem de pontos (2.562,24 pontos/m²) para o plano de voo de 30 m e *overlap* lateral de 81,45%; B) nuvem de pontos (630,97 pontos/m²) para o plano de voo de 50 m e *overlap* lateral de 81,97%, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Estimativa volumétrica e análise dos erros

O valor de cada pilha (nuvem de pontos) foi comparado com os valores volumétricos obtidos em campo, onde foi mensurada individualmente cada tora da pilha e totalizado o volume individual de cada empilhamento. Os valores podem ser observados na Tabela 8.

Os erros da estimativa volumétrica a partir da nuvem de pontos são maiores com plano de voo mais altos, pois o GSD se eleva com a altitude da aeronave, interferindo diretamente na precisão da estimativa (KÜNG et al., 2011). Portanto, os maiores erros foram observados na altitude de voo de 50 metros, em que ocorreu uma subestimativa média de 19,63%. Vale ressaltar que apenas em seis avaliações de pilhas houve superestimativas e todas no voo de 30 metros, porém com valores aceitáveis para uma atividade de averiguação de volume estocado em pátio.

Os valores de erros absolutos foram submetidos à análise de variância (Anova) e as médias ao teste de Tukey (5%) (SAS, 2002), conforme Tabela 9.

Tabela 8. Volumetria mensurada das pilhas de toras, estimativas nas três alturas de voo estudadas (30, 40 e 50 metros) e seus respectivos erros absolutos e percentuais, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Descrição	Volume cubado em campo (m³)	FE	Estimativa do volume (voo 30 m)	Erro absoluto (m³) (voo 30 m)	Erro %	Estimativa do volume (voo 40 m)	Erro absoluto (m³) (voo 40 m)	Erro %	Estimativa do volume (voo 50 m)	Erro absoluto (m³) (voo 50 m)	Erro %
Pilha 1	16,73	1,394	15,892	0,838	5,01%	15,160	1,570	9,38%	12,283	4,447	26,58%
Pilha 2	81,34	1,427	78,074	3,266	4,02%	75,180	6,160	7,57%	65,426	15,914	19,57%
Pilha 3	145,53	1,698	147,229	-1,699	-1,17%	139,631	5,899	4,05%	120,008	25,522	17,54%
Pilha 4	147,1	1,680	144,975	2,125	1,44%	136,366	10,734	7,30%	115,986	31,114	21,15%
Pilha 5	74,94	1,834	72,774	2,166	2,89%	70,005	4,935	6,59%	62,258	12,682	16,92%
Pilha 6	158,02	1,591	159,625	-1,605	-1,02%	152,196	5,824	3,69%	131,162	26,858	17,00%
Pilha 7	144,18	1,449	139,286	4,894	3,39%	133,411	10,769	7,47%	113,219	30,961	21,47%
Pilha 8	257,82	1,485	261,889	-4,069	-1,58%	248,411	9,409	3,65%	209,782	48,038	18,63%
Pilha 9	183,78	1,329	184,403	-0,623	-0,34%	174,778	9,002	4,90%	150,224	33,556	18,26%
Pilha 10	25,02	1,294	25,177	-0,157	-0,63%	24,002	1,018	4,07%	20,424	4,596	18,37%
Pilha 11	85,87	1,376	85,445	0,425	0,50%	75,430	10,440	12,16%	70,880	14,990	17,46%
Pilha 12	15,54	1,282	16,401	-0,861	-5,54%	15,504	0,036	0,23%	12,024	3,516	22,63%
Σ	1.335,870		1.331,168	4,702		1.260,074	75,796		1.083,676	252,194	
Mínimo	15,540	1,282	15,892	-4,069	-5,54%	15,160	0,036	0,23%	12,024	3,516	16,92%
Máximo	257,820	1,834	261,889	4,894	5,01%	248,411	10,769	12,16%	209,782	48,038	26,58%
Média	111,323	1,486	110,931	0,392	0,58%	105,006	6,316	5,92%	90,306	21,016	19,63%

FE: fator de empilhamento; Σ : somatório.

Tabela 9. Análise de variância das estimativas (erros em m³) e teste de Fischer, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Fontes de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	P-Valor
Entre tratamentos	2.706,18	2	1.353,1	18,9486	0,000
Intra tratamentos	2.356,47	33	71,408		
Total	5.062,65	35			

O teste de Tukey a 5% permitiu identificar dois tratamentos (planos de voo) com resultados semelhantes (Tabela 10). Na coluna de “Grupos homogêneos” observam-se dois X com mesmo alinhamento, o que representa a formação de um grupo, com isso pode-se afirmar com 95% de confiança que não existe diferença estatística nos resultados de volume obtidos entre o plano de voo de 30 e 40 metros.

Tabela 10. Formação dos grupos homogêneos pelo teste de Tukey 5% e resultados das diferenças entre os contrastes dos tratamentos dos planos de voo, Acre Madeiras Ltda., Rio Branco, Acre, 2015.

Tratamento	n (pilhas)	Média do erro (m ³)	Grupos homogêneos
Estimativa do volume para voo de 30 m	12	0,392	x
Estimativa do volume para voo de 40 m	12	6,316	x
Estimativa do volume para voo de 50 m	12	21,016	x

Contraste	Significativo	Diferença	+/- Limites (Tukey)
Voo 30 m – voo 40 m		-5,92448	8,46692
Voo 30 m – voo 50 m	*	-20,6243	8,46692
Voo 40 m – voo 50 m	*	-14,6998	8,46692

*Significativo ao teste de Tukey 5%.

Apesar dos planos de voo de 30 e 40 metros apresentarem o mesmo tempo de voo (14 minutos) e de processamento geral para obtenção da nuvem de pontos e da ortofoto (cerca de 3 horas), a área coberta

pelo voo de 40 metros foi 90,22% maior que aquela do plano de 30 metros. Portanto, é importante que o planejador da missão de voo observe e calcule previamente a área do pátio de toras para definir em qual altitude o RPA/ARP vai adquirir o conjunto de imagens, pois sem perder qualidade de estimativa pode-se sobrevoar uma área de pátio muito maior, de maneira a otimizar os trabalhos de campo.

Para o plano de voo de 50 metros o erro médio foi elevado, gerando um subestimativa acima de 19%. Esse erro elevado está associado a uma menor densidade de pontos por metro quadrado e, principalmente, à menor identificação de pontos-chaves correspondentes (*keypoints matching*) por unidade de área coberta em cada imagem.

Na Tabela 6 observa-se que cada plano de voo obteve em média entre 14.771 e 15.766 *keypoints matching* por imagem, o que parece ser um equilíbrio de resultados entre as estratégias de voo. No entanto, quando se avaliam os valores por unidade de área coberta para cada imagem nas três diferentes altitudes, verifica-se uma significativa disparidade entre os resultados alcançados pelos planos de voo, sendo: a) imagens a 30 metros com 7,804 *keypoints matching/m²*; b) imagens a 40 metros com 4,113 *keypoints matching/m²*; c) imagens a 50 metros com 2,699 *keypoints matching/m²*. A intensidade de pontos-chaves invariantes e coincidentes em imagens sucessivas auxilia na construção de uma nuvem de pontos consistente com a realidade modelada e, conseqüentemente, na boa estimativa volumétrica das pilhas de madeira. Isso já havia sido constatado por Küng et al. (2011); Se et al. (2001); Tsay e Lee (2012) e Westoby et al. (2012).

Portanto, mesmo com erros maiores de estimativa volumétrica no plano de voo de 50 metros de altitude, novas estratégias podem ser pensadas para minimizar essas falhas, a exemplo da mudança do formato, resolução da imagem e maior *overlap* lateral e longitudinal. Assim, não se deve descartar a possibilidade da realização de planos de voo mais altos, considerando que nem sempre será viável realizar uma missão em baixas altitudes, principalmente se o pátio madeireiro

estiver localizado junto à floresta, onde o dossel atinge altura superior a 50 metros.

Validação dos resultados

A validação do procedimento de estimativa de volume de toras empilhadas utilizando um multirrotor classe III ocorreu no pátio principal da Floresta Nacional de Jacundá (Flona Jacundá), localizada no Município de Candeias do Jamari no Estado de Rondônia.

A Flona Jacundá foi objeto de concessão florestal no ano de 2012, sendo concedidas as unidades de manejo florestal I e II para a empresa Madeflona Industrial Madeireira Ltda.

O Serviço Florestal Brasileiro (SFB) possui um sistema de controle da produção madeireira para as florestas sob concessão denominado Sistema de Cadeia de Custódia (SCC). Cada árvore de interesse comercial é cadastrada no momento do inventário da floresta e toda sua movimentação é rastreada até o desembarque na serraria. Informações como coordenada geográfica, espécie florestal, diâmetro à altura do peito (DAP), altura e qualidade do fuste, data do corte e transporte, entre outras, são registradas no sistema pela empresa detentora da concessão.

Essas informações são checadas em campo, de maneira periódica e amostral, pela Gerência de Monitoramento e Auditoria Florestal (Gemaf) do SFB. A auditoria de verificação demanda grande esforço de campo, com a mobilização de significativos recursos financeiros e humanos para sua execução.

Nessas condições a aeronave remotamente pilotada (RPA/ARP) pode se tornar uma ferramenta importante de gestão, por meio da geração de ortofotos de alta resolução e nuvem de pontos, sendo possível replicar a experiência descrita neste trabalho. Assim, a Flona Jacundá representa o ambiente adequado para validar os resultados do experimento.

Os mesmos equipamentos, métodos, configurações de hardware e software empregados no experimento também foram utilizados no pátio principal da Flona, porém em um plano de voo mais elevado (60 metros) e um *overlap* lateral de 90%. O plano de voo mais alto busca ajustar o procedimento de fotogrametria com RPA às características locais em que o pátio está localizado (no interior da floresta), portanto, a presença de árvores dominantes na bordadura do pátio impossibilita a realização de um voo baixo. Já o alto *overlap* permite intensificar o número de *keypoints matching* por imagem e por unidade de área mapeada, melhorando a qualidade do processo de densificação da nuvem de pontos.

De acordo com os resultados anteriormente alcançados no pátio madeireiro em Rio Branco, espera-se minimizar os erros de estimativa com essa estratégia de aumentar o *overlap*, mesmo em uma altitude de voo mais elevada.

A ortofoto obtida pelo processamento dos dados ARP permitiu identificar 134 pilhas de toras no pátio principal com um volume estéreo de 38.610 m³, ressaltando-se que oito das pilhas de toras possuíam calço.

O calço nas pilhas funciona como um apoio para que elas fiquem elevadas e não toquem o solo, minimizando os efeitos danosos da estocagem de toras a céu aberto. Porém, esse espaço vazio sob as toras empilhadas deve ser debitado da contabilidade da madeira estocada, que nesse caso foi de 1.027 m³. Assim, o volume estéreo obtido pelo algoritmo do software *Pix4D Mapper* foi de 37.583 m³.

O percentual de madeira sólida obtida pelo fator de empilhamento médio encontrado foi de 67,4% ± 6,8%. Dessa maneira, seguindo o mesmo método adotado no pátio da Acre Madeiras Ltda. (em Rio Branco, AC), foi estimado um volume de toras de 25.340 m³ (Figura 5).

De acordo com a cubagem e contabilidade da empresa, havia estocado no pátio 25.109 m³ de toras. A diferença entre o volume estimado, utilizando dados coletados pela fotogrametria com o RPA, e o volume contabilizado foi de 231 m³, ou seja, um erro percentual de 0,91%.

Foto: Evandro Orfanó Figueiredo

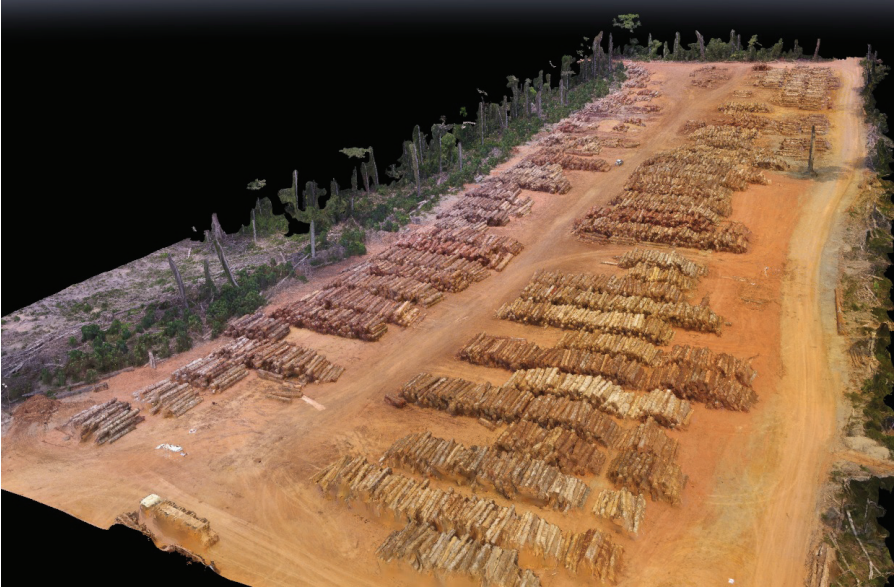


Figura 5. Nuvem de pontos de alta densidade (776 pontos/m²) obtida por fotogrametria com RPA/ARP do pátio central da Flona Jacundá, Rondônia, 2015.

Com a finalidade de confirmar a precisão das estimativas adquiridas com a nuvem de pontos pela fotogrametria com RPA, foi mensurada separadamente pela equipe do experimento uma amostra do pátio constituída por 17 pilhas de toras, resultando em um volume calculado em campo de 2.026 m³ e volume obtido pela fotogrametria RPA/ARP de 2.024 m³ de toras, perfazendo um erro percentual de 0,098%.

Posteriormente, o mesmo método foi testado para a estimativa do volume de toras no pátio do Batalhão da Polícia Militar Ambiental de Rondônia, sendo o erro de estimativa menor que 1% (Figura 6).



Foto: Evandro Orfanó Figueiredo

Figura 6. Nuvem de pontos de alta densidade (6.805 pontos/m²) obtida por fotogrametria com RPA/ARP do pátio do Batalhão da Polícia Militar Ambiental, Candeias do Jamari, Rondônia, 2016.

Conclusões

- Os melhores planos de voo foram aqueles que alcançaram maior densidade de *keypoint matching* por metro quadrado, ou seja, os voos de 30 e 40 metros.
- A precisão obtida pelas estimativas de volume de toras, considerando a nuvem de pontos de 30 e 40 metros de altura (plano de voo), é estatisticamente similar pelo teste de Tukey (5%).
- Planos de voo a partir de 50 metros com *overlap* lateral abaixo de 90% devem ser descartados.

- O método de cubagem de toras em pátio pela nuvem de pontos obtida pela fotogrametria digital por meio de RPA/ARP é um procedimento preciso, com margem de erro entre 0,098% e 5,92%, devendo a estratégia de voo buscar sempre a elevação dos *keypoints matching*.
- A precisão das estimativas está em função da execução correta de todas as etapas do método, com destaque para a obtenção do fator de empilhamento e do plano de voo adequado.

Referências

ANAC. **Requisitos gerais para veículos aéreos não tripulados e aeromodelos**. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/transparencia/audiencia/2015/aud13/anexol.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2016.

BERTOLA, A.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, J. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de. Determinação de fatores de empilhamento através do software Digitara. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p.837-844, nov./dez. 2003.

BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C.; MIKHAIL, E. M. **Introduction to modern photogrammetry**, New York: John Wiley & Sons, 2001. 477 p.

BICEGO, M.; LAGORIO, A.; GROSSO, E.; TISTARELLI, M. On the use of SIFT features for face authentication. In: CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION WORKSHOP, 2006, New York. [**Proceedings...**]. New York: IEEE Computer Society, 2006. p. 35-41.

BROWN, M.; LOWE, D. G. Automatic panoramic image stitching using invariant features. **International Journal of Computer Vision**, Sidney, v. 74, n. 1, p. 59-73, Aug. 2007.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. **Fator de empilhamento para plantações de *Eucaliptus* no Estado de São Paulo, 1998.** Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr38/cap03.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

DJI. **Phantom 3 prof/Adv. 2015.** Disponível em: <<http://www.dji.com/product/phantom-3/spec>>. Acesso em: 3 mar. 2016.

FERRARI, B. **No Maranhão, 27 serrarias clandestinas tiveram maquinário apreendido pelo Ibama, 2013.** Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/no-maranhao-27-serrarias-clandestinas-tiveram-maquinario-apreendido-pelo-ibama>>. Acesso em: 1 dez. 2013.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Levantamento fotogramétrico digital da Capela de Nossa Senhora da Escada. In: IBEROAMERICAN CONGRESS OF DIGITAL GRAPHICS, 8., 2004, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: SIGRADI, 2004.

IBAMA. **Ibama publica INs sobre matéria-prima florestal, produtos madeireiros e manejo de fauna silvestre.** Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/ibama-publica-in-sobre-aproveitamento-de-materia-prima-florestal-sobre-medicao-e-organizacao-de-estoques-de-produtos-madeireiros-e-sobre-manejo-de-fauna-em-vida-livre>>. Acesso em: 17 jul. 2015.

IMAZON. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados, 2009.** Disponível em: <<http://amazon.org.br/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira-producao-receita-e-mercados/>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

KÜNG, O.; STRECHA, C.; BEYELER, A.; ZUFFEREY, J. C.; FLOREANO, D.; FUA, P.; GERVAIX, F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AERIAL VEHICLE IN GEOMATICS (UAV-g), 2011, Zurich. **Proceedings...** Zurich: ETH Zurich; IGP; geomETH; UAV Research Group, 2011. (N. EPFL-CONF-168806).

LEMES NETO, M. C. **Orientação semi-automática de uma sequência de pares de imagens frontais por fototriangulação a partir de fotocoordenadas extraídas pelo SIFT**. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.

LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 7., 1999, Kerkyra, Greece. **Proceedings...** Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 1999. p. 1150-1157.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, Sidney, v. 60, n. 2, p. 91-110, Nov. 2004.

MUNARETTO, L. A. C. **Vant e Drones: a Aeronáutica ao alcance de todos**. São José dos Campos, 2015. 168 p.

PIX4D. **How Pix4Dmapper calculates the Volume?** Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559239-How-Pix4Dmapper-calculates-the-Volume-#gsc.tab=0>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

ROMERO, V. R.; VILLAREAL, A. M.; LEÓN, J. L. T.; HERNÁNDEZ, A. H. Perspectivas de la tecnología VANT en el cultivo de palma de aceite: monitorización del cultivo mediante imágenes aéreas de alta resolución. **Revista Palmas**, Bogotá, v. 36, n. 3, p. 25-41, 2015.

SAS-STAT User's guide: statistics: release 6.03. edition. Cary, NC, 1990. 584 p.

SCOLFORO, J. R. S.; PÉREZ, J. F. M.; MELLO, J. D.; OLIVEIRA, A. D.; CAMOLESI, J. F.; BORGES, L. F. R.; ACERBI JÚNIOR, F.W. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e quantidade de moirões para a candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish). **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 87-102, 2004.

SE, S.; LOWE, D.; LITTLE, J. Vision-based mobile robot localization and mapping using scale-invariant features. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2001, Seoul.

Proceedings... Piscataway, NJ: IEEE Robotic and Automation Society, 2001. p. 2051-2058.

SE, S.; LOWE, D.; LITTLE, J. Global localization using distinctive visual features. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2002, Lausanne. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE Robotics and Automation Society, 2002. p. 226-231.

SILVA, M. C.; SOARES, V. P.; PINTO, F. D. A. C.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. A. S. Determinação do volume de madeira empilhada através de processamento de imagens digitais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 104-114, dez. 2005.

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

TSAY, J. R.; LEE, M. S. SIFT for dense point cloud matching and aero triangulation. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39-B3, p. 69-74, 2012. Edition of XXII ISPRS Congress, 2012, Melbourne.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, Amsterdam, n. 179, p. 300-314, Dec. 2012.

ZUFFEREY, J. C.; BEYELER, A.; FLOREANO, D. Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power. **International Journal of Micro Air Vehicles**, Thousand Oaks, v. 2, n. 2, p. 107-117, June 2010.

Embrapa

Acre

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

