

Imagens obtidas por drone para estimativas de diâmetro e altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária

Images obtained by drone to estimate the diameter and height of trees in an integrated agricultural production system

José Otávio de Almeida Bueno¹, Silvio Crestana², Edilson da Silva Guimarães³, José Ricardo Macedo Pezzopane⁴, Vandoir Bourscheidt⁵, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁶

¹ Doutorando, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, tvnalmeida@gmail.com

² Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, silvio.crestana@embrapa.br

³ Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, edilson.guimaraes@embrapa.br

⁴ Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br

⁵ Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (SP), Brasil, vandoir@ufscar.br


⁶ Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

RESUMO

Utilizar dados de sensoriamento remoto tem auxiliado a realização de inventários florestais, pois podem fornecer informações a respeito dos objetos sem que haja contato direto com eles. Porém, para realizar o planejamento das atividades de manejo florestal, é necessário ter informações confiáveis, sendo que o inventário é a base para planejar o uso dos recursos florestais. Destaca-se que as variáveis mais utilizadas para realizar inventários florestais são altura e diâmetro das árvores, e realizar a estimativa de variáveis dendrométricas sempre foi alvo de estudos que procuram encontrar técnicas novas que facilitem a obtenção dos dados para minimizar os custos com inventários. A medição dessas variáveis é fundamental para estimar o volume e a biomassa das árvores. Nesse sentido, para reduzir o tempo de trabalho em campo com coleta de dados e aumentar o número de indivíduos de eucaliptos medidos em áreas como as de sistemas de integração agropecuária, faz-se necessário o monitoramento com o uso de ferramentas derivadas das geotecnologias, tais como o geoprocessamento, que, por meio das imagens capturadas por drones, permite monitorar o crescimento das plantas e realizar análises, reduzindo assim o tempo e o custo da operação. Dessa forma, o objetivo deste estudo consistiu em verificar o potencial da nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento de imagens capturadas por drone, em estimar o diâmetro na altura do peito (DAP - 1,3 metro acima do nível do solo) de árvores de eucaliptos plantadas em um sistema de integração lavoura pecuária floresta, bem como estimar altura das árvores com base nos modelos de elevação gerados. A pesquisa foi realizada em uma área da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil. A aeronave remotamente pilotada utilizada para realizar os voos foi o drone Phantom 4 da DJI, os voos para aquisição do DAP foram realizados a uma altura de 2 metros acima do nível do solo e na área central entre as linhas das árvores, enquanto para aquisição de altura os voos foram realizados a uma altura de 90 metros acima do nível do solo, com sobreposições de 80% entre as fotos. As imagens foram capturadas nas bandas do visível utilizando uma câmera com foco de 3,61 milímetros. Foram medidas e estimadas um total de 13 árvores para o DAP e 188 árvores para estimativa de altura. Quando correlacionados, o valor de r (coeficiente de correlação de Pearson) calculado foi de 0,62 para os valores de diâmetro medidos em campo com fita diamétrica e estimados por meio da nuvem tridimensional de pontos e de 0,58 para a estimativa de altura das árvores. Os resultados indicam a viabilidade de estimar o diâmetro na altura do peito, bem como a altura de eucaliptos no sistema de integração lavoura pecuária floresta, processando imagens das bandas RGB.

Palavras-chave: sistema integrado; ILPF; sensoriamento remoto; geoprocessamento.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000051>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.



ABSTRACT

Remote sensing data has helped to carry out forest inventories by providing information about objects without direct contact with them. However, the planning of forest management activities requires reliable information, and inventory is the basis for planning the use of forest resources. It is noteworthy that the most used variables for forest inventories are the height and diameter of trees; and estimating dendrometric variables has always been the subject of studies that seek to find new techniques that facilitate data collection to minimize inventory costs. The measurement of these variables is essential to estimate the volume and biomass of the trees. Thus, to reduce fieldwork time with data collection and increase the number of eucalyptus individuals measured in areas such as agricultural integration systems, tools derived from geotechnologies, such as geoprocessing, can reduce the time and cost of the operation by using images captured by drones to monitor the growth of plants and perform analyses. This study aimed to verify the potential of the three-dimensional cloud of points, generated after processing images captured by drone, in estimating the diameter at breast height (DBH - 1.3 meters above ground level) of eucalyptus trees planted in a crop-livestock-forest integration system, as well as estimating tree heights based on the elevation models generated. The measurement of this variable is essential to estimate the volume and biomass of the trees. The research was carried out in an area of Embrapa Pecuária Sudeste, located in the municipality of São Carlos, state of São Paulo, Brazil. The remotely piloted aircraft used to carry out the flights was the DJI Phantom 4 drone, the flights were carried out at a height of 2 meters above ground level and in the central area between the tree lines, while for height acquisition, flights were performed at a height of 90 meters above ground level with 80% overlaps between photos. The images were captured in the visible bands using a camera with a focus of 3.61mm. A total of 13 trees were measured and estimated for DAP and 188 trees for height estimation. When correlated, the value of r (Pearson's correlation coefficient) calculated was 0.62 for the diameter values measured in the field with a diametric tape and estimated through the three-dimensional cloud of points and 0.58 for the estimation of tree height. The results indicate the feasibility of estimating the diameter at breast height as well as the height of eucalyptus trees in the integrated crop-livestock forestry system, by processing images of the RGB bands.

Keywords: integrated system; ILPF; remote sensing; geoprocessing.

1 INTRODUÇÃO

Os dados provenientes de técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizados para dar suporte aos inventários florestais, cujos resultados contribuem para estudos que abordem a temática das emissões globais de carbono e análises que envolvem biomassa madeireira (Chave et al., 2005; Zonete et al., 2010). O avanço tecnológico, bem como a redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos, atrelado à possibilidade de se extrair informações de características de distintas imagens, têm facilitado a utilização do sensoriamento remoto para a realização dos inventários florestais (Giongo et al., 2010; Macedo, 2009).

Os sistemas integrados – como a área onde foi realizado este estudo – foram pensados e desenvolvidos com o intuito de diminuir os impactos advindos das pastagens convencionais, os quais combinam árvores, pasto e gado, e ambos são manejados de maneira integrada (Marcondelli, 2019). Sistemas como o de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) têm apresentado resultados significativos na melhoria da qualidade do solo, além de serem adequados para a produção de subprodutos como carvão, madeira, frutas, que contribuem para aumentar a diversidade na área e a renda para produtores rurais (Alonso, 2011; Macedo et al., 2013; Murgueitio et al., 2015).

Silva et al. (2012) relatam que sistemas que integram lavoura pecuária e floresta na mesma área são complexos, e essa combinação faz com que haja in-

terações entre os componentes que variam tanto no tempo quanto no espaço. Essa combinação pode elevar os teores de matéria orgânica no solo, bem como contribuir para um melhor aproveitamento dos nutrientes (Balbino et al., 2011). Durante o planejamento do sistema, um dos componentes importantes são as árvores, ou seja, o item florestal, o qual pode proporcionar a produção de madeira para diversos segmentos, além de poder ser utilizado no sistema como um item importante para a conservação ambiental no Brasil (Pang et al., 2019).

Para realizar o planejamento das atividades de manejo florestal, é necessário ter informações confiáveis, e a este propósito Zonete et al. (2010) destacam que o inventário florestal é a base para planejar o uso dos recursos florestais. As variáveis mais utilizadas para realizar inventários florestais, de acordo com Freitas e Wichert (1998), são altura e diâmetro das árvores, ao passo que são aplicadas para determinar a área basal, bem como o volume de madeira existente em uma determinada área. Ademais, tendo aferido essas variáveis em campo, pode-se obter as potencialidades produtivas, utilizadas para estabelecer planos comerciais de manejo, ordenação florestal e de pesquisa (Jesus et al., 2012; Binoti et al., 2013).

Dentre os métodos automáticos por sensoriamento remoto existentes para realizar o levantamento de informações de florestas, destaca-se o LiDAR (Light Detection and Ranging), que pode adquirir informa-

ções em escalas maiores, possibilitando a aquisição de dados para inventários em intervalos de tempo reduzidos (Pereira, 2014). Essa tecnologia se baseia nos princípios utilizados por radar, porém utilizando pulsos laser de alta frequência para localizar os objetos de interesse. Esses pulsos penetram por aberturas pequenas no dossel florestal, possibilitando a aquisição de informações a respeito da estrutura da floresta e do relevo (Giongo et al., 2010).

Destaca-se também o crescente uso das aeronaves remotamente pilotadas – neste estudo chamadas de drones – em aplicações que auxiliam os inventários florestais. Esses equipamentos são veículos aéreos que variam entre pequeno e médio porte, capazes de carregar pequenas cargas, podendo ainda ser dotados de sensores como câmeras filmadoras, fotográficas e multiespectrais (Medeiros, 2007). A ampla utilização dessa tecnologia está relacionada com a facilidade de adaptação às necessidades de cada projeto, visto que as características das imagens estão associadas a parâmetros como resolução, escala e tipos de sensores, que são escolhidos de acordo com o objetivo de cada estudo (Morgan et al., 2010).

Santos et al. (2017) afirmam que realizar a estimativa de variáveis dendrométricas foi sempre alvo de estudos que procuram encontrar técnicas novas que facilitem a obtenção dos dados em via de minimizar os custos com inventários. Nesse sentido, para reduzir o tempo de trabalho em campo com coleta de dados e aumentar o número de indivíduos de eucaliptos medidos em áreas de ILPF, faz-se necessário o monitoramento com o uso de ferramentas derivadas das geotecnologias, tais como: Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto (SR) e geoprocessamento, que, por meio das imagens capturadas por drones, permitem monitorar o crescimento das plantas e realizar análises, reduzindo assim o tempo e o custo da operação (Oliveira et al., 2018).

A altura de uma árvore pode ser definida como sendo a distância linear ao longo do eixo principal da planta medida do solo até ao topo (Machado; Figueiredo Filho, 2014). West (2009) define diâmetro à altura do peito (DAP) como sendo o diâmetro da seção transversal perpendicular ao eixo do tronco da árvore a 1,3 metro acima do nível do solo. A medição da altura e do DAP é fundamental para que se possa estimar o volume e a biomassa das árvores (Yoon et al., 2013). Sob esse contexto, o objetivo deste estudo consistiu em verificar o potencial da nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento de imagens capturadas com o auxílio de um drone, em estimar o DAP de eucaliptos plantados em um sistema de ILPF, bem

como estimar altura das árvores com base nos modelos de elevação gerados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57'42"S, 47°50'28"W, 860 m) em sistema de integração lavoura pecuária floresta composto de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, arborizada com árvores de *Eucalyptus urograndis* clone GG100, plantadas em 2011 no espaçamento de 15 m x 2 m e desbastadas em 2016 para um espaçamento de 15 m x 4 m quando da realização desse estudo (Pezzopane et al., 2019a) (Figura 1). A área tem um total de 12 hectares e está dividida em 24 piquetes com a mesma quantidade de área cada (Bernardi et al., 2019; Pezzopane et al., 2019b; Bueno,

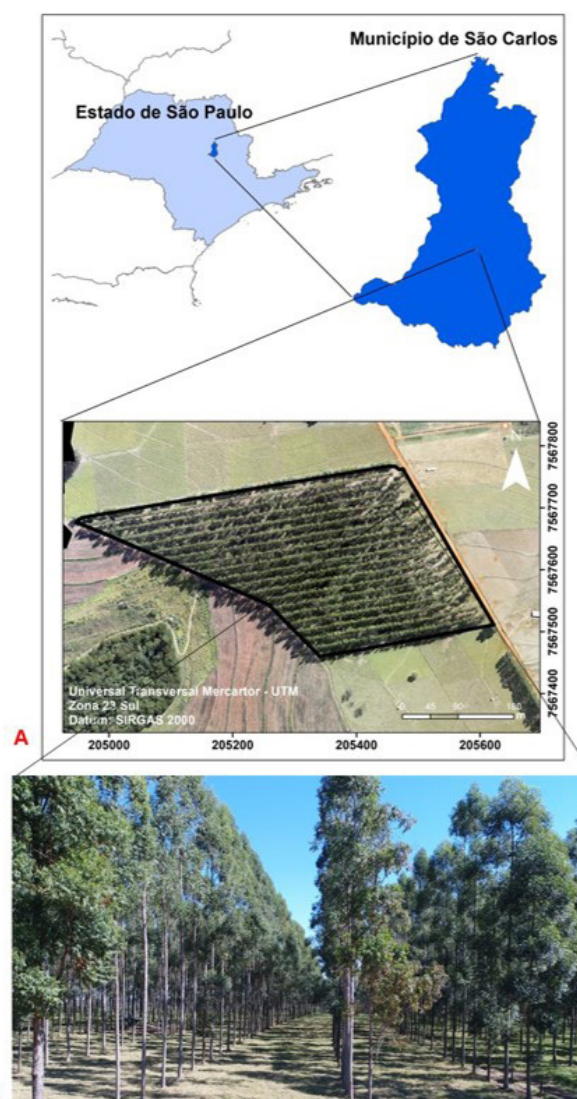


Figura 1. A – Localização geográfica da área de estudo; B – Fachada lateral entre as linhas das árvores.

Fonte: Bueno, 2021.

2021). Calderano Filho et al. (1998) destacaram o clima do local como tropical (classificação de Köppen: Cwa), sendo que de abril a setembro a estação predominante é seca com precipitação e temperatura média de 250 mm e 19,9 °C respectivamente; já de outubro a março, a estação que predomina é úmida com precipitação e temperatura média de 1.100 mm e 23 °C (Pezzopane et al., 2021).

A aeronave remotamente pilotada utilizada para realizar os voos foi o drone Phantom 4, da DJI, cuja autonomia de voo é de aproximadamente 27 minutos. As bandas da câmera utilizada são RGB com foco de 3,61 milímetros. As imagens para gerar as nuvens tridimensionais de pontos, que foram usadas para extrair os dados de DAP dos eucaliptos, foram capturadas entre as linhas das árvores, com voos realizados na altura de 2 (dois) metros acima do nível do solo e na área central entre as linhas das árvores do sistema integrado (Figura 1B).

As imagens foram processadas no software Open Drone Map (ODM), com base em fotogrametria e visão computacional para classificar e extrair informações 3D da nuvem tridimensional de pontos geradas (Cheng et al., 2022). Para realizar a classificação e a filtragem automática da nuvem tridimensional de pontos, os algoritmos têm como base a altura, o ângulo e as distâncias de cada ponto, com o intuito de diferenciar no terreno cada objeto, como prédios, árvores, rios, entre outros (Westoby et al., 2012).

A nuvem tridimensional de pontos georreferenciada gerada no software ODM foi exportada para o software CloudCompare em formato “las”, a qual consiste em pontos que são combinados entre as sobreposições das imagens. No mesmo software, realizou-se a filtragem manual dos pontos de não interesse e dos ruídos que ficaram fora da tendência da superfície do relevo (Hung et al., 2018). Primeiro, separaram-se apenas as áreas de interesse e, na sequência, foram selecionadas apenas as linhas de árvores foco do estudo, ou seja, aquelas que apresentam as árvores que também foram mensuradas em campo com fita diamétrica. E os instrumentos mais utilizados para medir essa variável são fita diamétrica e suta dendrométrica (Magarik et al., 2020).

Em seguida, com as linhas das árvores de interesse selecionadas, deu-se início à seleção individual dos eucaliptos que foram medidos em campo. Na sequência, as árvores individuais foram segmentadas a cada 1,3 metro de altura. Na primeira altura de 1,3 metro, utilizando a ferramenta de medir distâncias entre dois pontos, mediu-se a distância entre os pontos nesse local, sendo o valor encontrado representante do DAP da árvore em questão. O DAP foi medido com base na

nuvem tridimensional de pontos da Figura 3C e 3D. E foram realizadas as medições para as mesmas árvores que tiveram os valores de DAP medidos em campo com fita diamétrica

Para realizar a estimativa de altura, utilizou-se a mesma aeronave remotamente pilotada. Para esta variável, as coletas de dados foram realizadas em duas etapas. A primeira em campo utilizando um aparelho de GPS portátil para obter as coordenadas geográficas das árvores a serem medidas. Posteriormente, utilizando um hipsômetro digital (hipsômetro/clinômetro eletrônico Haglof®), foram aferidas as alturas das árvores.

Na segunda etapa – de levantamento aéreo –, definiram-se inicialmente os planos de voo em escritório, onde se delimitou o polígono do terreno para uma área maior que a de estudo (Hung et al., 2018; Inguaggiato, 2020). A câmera durante o voo ficou posicionada para baixo/nadir e capturou imagens em cores verdadeiras (RGB) na faixa do visível (Van Iersel et al., 2018; Avtar et al., 2020; Yamaguchi et al., 2021). A sobreposição de imagens foi de 80%, tanto frontal quanto lateral (Van Iersel et al., 2018), e o voo realizado a uma altura de 90 metros, no horário entre as 11 h e 12 h.

Após o processamento das imagens aéreas capturadas para realizar a estimativa de altura, foram gerados os Modelos Digitais de Elevação (MDE), os quais foram exportados para o software QGIS, onde foi subtraído o Modelo Digital de Terreno (MDT) do Modelo Digital de Superfície (MDS), gerando assim o Modelo Digital de Altura (MDA), o qual representa os valores de altura dos objetos que estão acima do nível do solo (Pereira, 2014). No mesmo software aplicou-se uma ferramenta de reamostragem para agregar os valores dos pixels do MDA (Van Iersel et al., 2018). Na sequência, com base na localização geográfica das árvores aferidas em campo, foram extraídos os valores de altura das árvores estimadas pelo MDA. Por fim, os valores de altura estimados e aferidos em campo foram correlacionados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O percurso de voo realizado entre as linhas dos eucaliptos, a uma altura de 2 (dois) metros acima do nível do solo, com o intuito de se obter posteriormente uma nuvem tridimensional de pontos para extrair dela os valores de diâmetro, pode ser observado na Figura 2.

O voo realizado entre as linhas das árvores capturou um total de 43 imagens. A nuvem tridimensional de pontos gerada apresentou 2.253,056 pontos (Figura 3A). A nuvem tridimensional segmentada apenas para a área de interesse, ou seja, entre as linhas

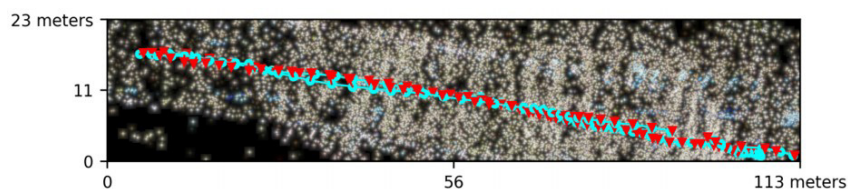


Figura 2. Percurso do voo entre as linhas das árvores. Os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.

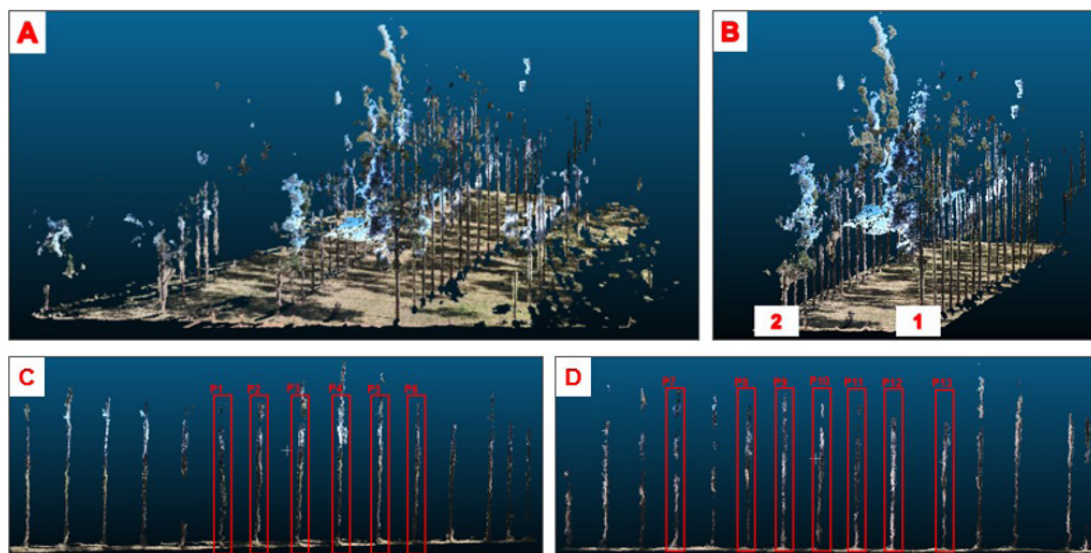


Figura 3. A - Nuvem tridimensional de pontos sem filtragem dos pontos; B - Nuvem tridimensional com filtragem dos pontos para as duas linhas de árvores; C - Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 1; D - Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 2.

das árvores, apresentou 1.310,491 pontos (Figura 3B). Na sequência, a nuvem tridimensional de pontos foi segmentada apenas para as duas linhas das árvores. A linha (1) apresentou um total de 182.827 pontos (Figura 3C). A linha (2) apresentou um total de 198.707 pontos (Figura 3D).

A Tabela 1 mostra as medidas de DAP de cada planta, bem como o número de pontos encontrados na nuvem tridimensional e as coordenadas geográficas de cada uma das árvores.

A média dos valores de DAP calculada com base nas 13 árvores estimadas e por meio da nuvem tridimensional de pontos apresentou um valor de 26.80 cm, enquanto a média dos valores aferidos em campo com fita diamétrica foi de 29.20 cm. Quando correlacionados, o valor de r (coeficiente de correlação de Pearson) calculado foi de 0.62. Observa-se que, quando comparado os valores de DAP estimados por meio da nuvem tridimensional de pontos com os medidos em campo com fita diamétrica, há uma tendência dos dados da nuvem de pontos em subestimar os valores medidos em campo.

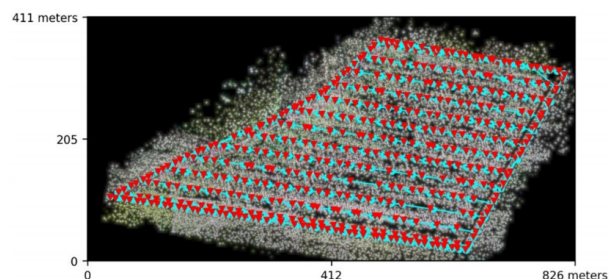


Figura 4. Percurso do voo aéreo. Os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.

Já para o voo aéreo, realizado para estimar a altura dos eucaliptos, foram capturadas 474 imagens. A nuvem tridimensional de pontos apresentou um total de 44.124,726 pontos. O percurso do voo realizado capturou imagens em 13 linhas paralelas nas regiões centrais da área de estudo, perfazendo um total de área coberta de 0,27 km² (Figura 4).

O MDT elaborado após o processamento das imagens capturadas com o voo realizado pelo drone apresentou valores de altitude que variam de 804 m a 824 m

Tabela 1. Valores de DAP, número de pontos e localização geográfica de cada árvore.

Planta	DAP – Nuvem de pontos (cm)	DAP – Fita diamétrica (cm)	Número de pontos	Log (X)	Lat (Y)
1	27.91	29.03	5397	-47.851401	-21.971059
2	30.76	33.06	9501	-47.851439	-21.971065
3	26.77	26.4	11594	-47.851477	-21.971071
4	26.08	29.6	13861	-47.851516	-21.971077
5	28.88	30.8	13987	-47.811554	-21.971082
6	27.37	27.1	10807	-47.851592	-21.971088
7	25.63	29.0	10988	-47.851253	-21.971178
8	27.22	31.50	12317	-47.851291	-21.971184
9	27.61	30.6	11802	-47.85133	-21.971191
10	26.64	27.90	8282	-47.851368	-21.971197
11	22.05	27.70	5791	-47.851406	-21.971203
12	27.65	28.30	12692	-47.851444	-21.971209
13	24.43	27.80	8767	-47.851482	-21.971215

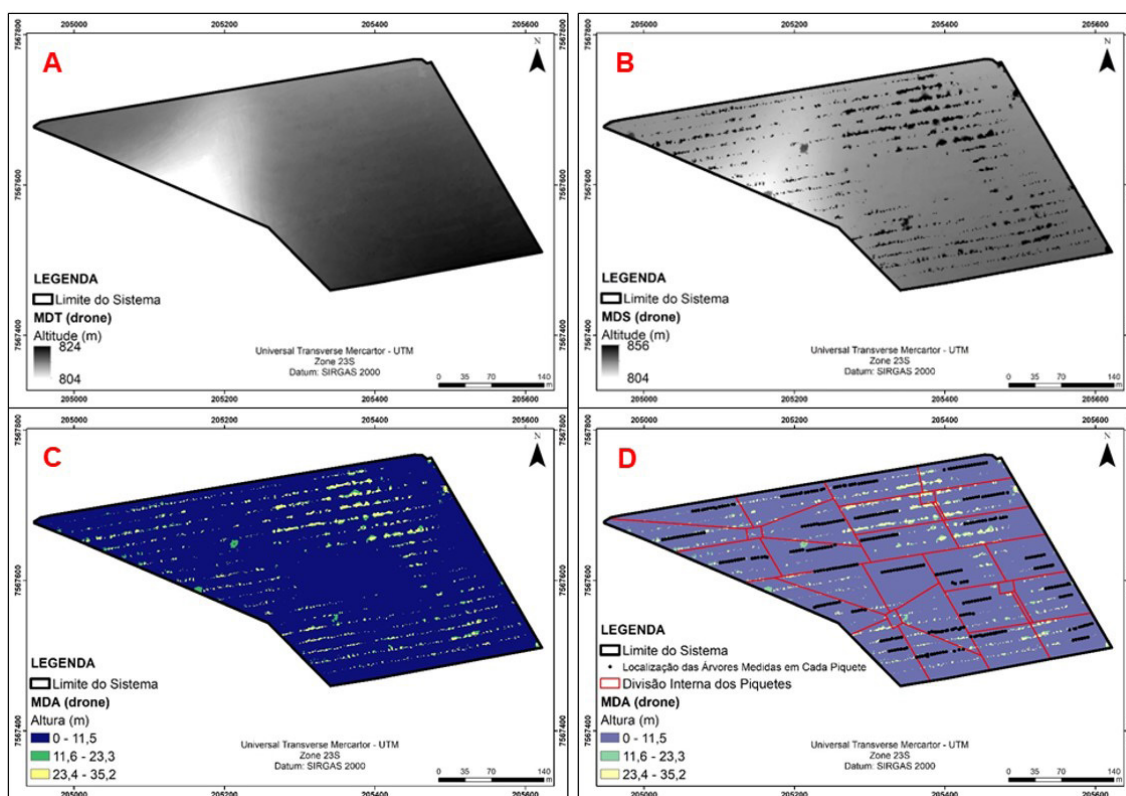


Figura 5. A – Modelo Digital de Terreno; B – Modelo Digital de Superfície; C – Modelo Digital de Altura; D – Modelo Digital de Altura com transparência na imagem, divisão interna dos piquetes e localização geográfica das árvores medidas em campo.

(Figura 5A), enquanto o MDS apresentou valores que variam de 804 m a 856 m (Figura 5B). Tendo em vista que a área do sistema integrado é composta pelo eucalipto como o componente florestal, subtraindo o

MDT do MDS tem-se o MDA que representa os valores de altura das árvores (Figura 5C). Tendo como base o MDA e a localização geográfica dos eucaliptos, foram extraídos os valores das árvores estimadas, sen-

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de altura estimados pelo Modelo Digital de altura (MDA) e medidos em campo com hipsômetro digital.

Parâmetros Estatísticos	Hipsômetro Digital	MDA
Média	30.3	29.4
Desvio P.	2.580	1.990
Curtose	-0.556	-0.617
Assimetria	-0.442	-0.365
Mínimo	23.8	24.4
Máximo	34.7	33.4
N	188	

do que a localização geográfica de cada árvore aferida em campo, a divisão interna dos piquetes do sistema e o MDA podem ser observados na Figura 5D, destaca-se que se aplicou uma transparência na imagem para melhor visualização dos piquetes e dos pontos geográficos que representam as árvores.

Os valores das alturas das árvores extraídos do MDA foram analisados por meio das estatísticas descritivas das alturas (Tabela 2). As médias das alturas apresentaram diferença de 0,9 m. Os valores de altura obtidos em campo com hipsômetro digital apresentaram maior amplitude com relação aos estimados pelo MDA.

Nota-se que nas regiões centrais do MDS e do MDA ficaram espaços considerados vazios, ou seja, sem valor estimado. Foram extraídos valores estimados de 188 árvores, as quais foram correlacionadas com os valores das plantas medidas em campo. Quando correlacionadas, o valor do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as alturas das árvores aferidas em campo e estimadas foi de 0,58, indicando uma correlação moderada positiva entre as medidas.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicam a viabilidade de estimar o diâmetro na altura do peito e altura dos eucaliptos no sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta, processando imagens verdadeiras das bandas RGB capturadas com o uso de drones. Com relação ao DAP, foi possível realizar a estimativa em função da configuração das linhas das árvores da área de estudo, que permitiu o sobrevoo do equipamento de modo a capturar imagens do tronco das árvores. Como relatado, observou-se uma tendência nos valores estimados com base nos dados das imagens processadas, tal fato pode estar associado com a cor-

respondência entre os pontos que são considerados comuns no processamento das imagens capturadas. Desta maneira, para o aumento da acurácia da estimativa do DAP, sugere-se a realização de voos entre as linhas das árvores alternando as alturas em que são capturadas as imagens, bem como aumento do número de fotos em intervalos menores entre os disparos da câmera, havendo assim maior sobreposição entre as imagens e maior será o número de pontos correspondentes entre elas. Esse procedimento aumentará o detalhamento da nuvem tridimensional de pontos sobre a qual são extraídos os valores de DAP. Já para a variável altura, sugere-se que sejam realizados voos aéreos em pelo menos duas orientações com relação à linha das árvores – por exemplo, sul a norte e leste a oeste –, aumentando-se o número de imagens capturadas, proporcionando maior correspondência dos pontos considerados comuns entre elas, diminuindo os locais com falhas nos MDA e contribuindo para melhor correlação entre os valores estimados e medidos em campo. Para ambos os casos, o uso de pontos de controle em solo e/ou o uso de equipamentos servidos de posicionamento preciso (ex. GPS RTK) podem ajudar a melhorar os resultados observados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Embrapa (Projetos Rede Pecuária, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp (Processos 15/26627-5, 16/02959-1, 19/04528-6) pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, J. Silvopastoral systems and their contribution to the environment. *Canadian Journal of Agricultural Science*, v. 45, n. 2, p. 107-114, 2011.
- AVTAR, R.; SUAB, S. A.; SYUKUR, M. S.; KOROM, A.; UMARHADI, D. A.; YUNUS, A. P. Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. *Remote Sensing*, v. 12, n. 18, p. 3030, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs12183030>.

- BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. **Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**. Platina: Embrapa Cerrados; Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 52 p.
- BERNARDI, A. D. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. D. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 4, p. 290-300, 2019. DOI: <http://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n4p290-300>.
- BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, p. 639-645, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400007>.
- BUENO, J. O. A. **Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado de produção agropecuária**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. DOI: <http://doi.org/10.11606/D.18.2021.tde-22032023-141941>.
- CALDERANO FILHO, B.; DOS SANTOS, H. G.; DA FONSECA, O. O. M.; DOS SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais**. São Carlos: Embrapa-CNPS, 1998.
- CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- CHENG, M. L.; MATSUOKA, M.; LIU, W.; YAMAZAKI, F. Near-real-time gradually expanding 3D land surface reconstruction in disaster areas by sequential drone imagery. **Automation in Construction**, v. 135, p. 104105, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104105>.
- FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. **Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Critério 400**. Piracicaba: IPEF, 1998. (Circular técnica nº188).
- GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; AMARAL MACHADO, S.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010. DOI: <http://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.231>.
- HUNG, M. N. W. B.; MOREIRA SAMPAIO, T. V.; SCHULTZ, G. B.; CROVADOR SIEFERT, C. A.; LANGE, D. R.; SYRING MARANGON, F. H.; Santos, I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **RAEGA: O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 215-231, 2018. DOI: <http://doi.org/10.5380/raega.v43i0.56621>.
- INGUAGGIATO, F. F. **Utilização das aeronaves remotamente pilotadas como ferramenta de análise da pós-ocupação de uso do solo: o estudo de caso do Shopping Passeio, São Carlos (SP) e seu estudo de impacto de vizinhança**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- JESUS, C. M. D.; MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A.; IMAÑA ENCINAS, J. Avaliação de diferentes hipsômetros para medição da altura total em um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 291-299, 2012.
- MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G.; ARAÚJO, A. R. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. In: ENCONTRO DE ADUBAÇÃO DE PASTAGENS DA SCOT CONSULTORIA, 2013, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Bebedouro: Scot Consultoria, 2013. p. 158-181.
- MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus sp.* através de laser scanner aerotransportado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 3. ed. Guarapuava: Unicentro, 2014. 316 p.
- MAGARIK, Y. A.; ROMAN, L. A.; HENNING, J. G. How should we measure the DBH of multi-stemmed urban trees? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 47, p. 126481, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126481>.
- MARCONDELLI, A. C. B. **Comparação de ciclagem de nutrientes em pastagens convencionais, sistemas silvipastoris e floresta estacional semidecídua**. 2019. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- MORGAN, J. L.; GERGEL, S. E.; COOPS, N. C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. **BioScience**, v. 60, n. 1, p. 47-59, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1525/bio.2010.60.1.9>.
- MURGUEITIO, E.; BARAHONA, R.; CHARÁ, J. D.; FLORES, M. X.; MAURICIO, R. M.; MOLINA, J. J. The intensive silvopastoral systems in Latin America sustainable alternative to face climatic change in animal husbandry. **Canadian Journal of Agricultural Science**, v. 49, n. 4, p. 551-554, 2015.
- OLIVEIRA, O. A.; TEIXEIRA, T. M. A.; PASSO, D. P. Mapeamento dos conflitos de uso da terra em áreas de preservação permanentes dos rios que contribuem para o barramento do rio paranã, Formosa-GO. **Boletim Goiano de Geografia**,

- v. 38, n. 3, p. 491-515, 2018. DOI: <http://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56348>.
- PANG, K.; VAN SAMBEEK, J. W.; NAVARRETE, T. Responses of legumes and grasses to non-moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 25-38, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10457-017-0068-7>.
- PEREIRA, J. P. **Mensuração automática de copas de *Araucaria augustifolia* (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; FARIA PEDROSO, A.; ESTEVES, S. N. Forage productivity, and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 39-49, 2019b. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; CAMPOS BERNARDI, A. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J., Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019a. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.
- SANTOS, T. T.; BASSOI, L. H.; OLDONI, H.; MARTINS, R. L. Automatic grape bunch detection in vineyards based on affordable 3D phenotyping using a consumer webcam. In: BARBEDO, J. G. A. (ed.). CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 11., 2017, Campinas. **Anais [...]**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 89-98.
- SILVA, G. F. D.; CURTO, R. D. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. D. C. Avaliação de métodos de edição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 341-348, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200015>.
- VAN IERSEL, W.; STRAATSMA, M.; ADDINK, E.; MIDDELKOOP, H. Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 141, p. 112-123, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.011>.
- WEST, P. **Tree and forest measurement**. Cham: Springer Science & Business Media, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3>.
- 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 application. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- YAMAGUCHI, T.; TANAKA, Y.; IMACHI, Y.; YAMASHITA, M.; KATSURA, K. Feasibility of combining deep learning and RGB images obtained by unmanned aerial vehicle for leaf area index estimation in rice. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 84, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs13010084>.
- YOON, T. K.; PARK, C. W.; LEE, S. J.; KO, S.; KIM, K. N.; SON, Y.; LEE, K. H.; OH, S.; LEE, W.; SON, Y. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, n. 3, p. 344-349, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.006>.
- ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALEN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 225-235, 2010.