

1  
2 **MONITORAMENTO DE LAVOURAS DE CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS AÉREAS E**  
3 **SENSORES A LASER**

4  
5  
6 **TATIANA FERNANDA CANATA<sup>1</sup>, MAURÍCIO MARTELLO<sup>2</sup>, TIAGO RODRIGUES TAVARES<sup>3</sup>,**  
7 **PETERSON RICARDO FIORIO<sup>4</sup>, JOSÉ PAULO MOLIN<sup>5</sup>**

8  
9 <sup>1</sup> Eng<sup>a</sup> de Biossistemas, Doutoranda, Laboratório de Agricultura de Precisão, Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP/ESALQ, Piracicaba-  
10 SP, (19) 3447-8551, tatiana.canata@usp.br

11 <sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Ambiental, Doutorando, Laboratório de Agricultura de Precisão, Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP/ESALQ, Piracicaba – SP.

12 <sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Doutorando, Laboratório de Agricultura de Precisão, Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP/ESALQ, Piracicaba – SP.

13 <sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Professor, Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP/ESALQ, Piracicaba – SP.

14 <sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Professor, Laboratório de Agricultura de Precisão, Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP/ESALQ, Piracicaba – SP.

15  
16  
17 Apresentado no  
18 **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- ConBAP 2018**  
19 *Curitiba, Paraná, 2 a 4 de outubro de 2018*

20  
21 **RESUMO:** Os sensores a laser, baseados em tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), e as imagens  
22 aéreas adquiridas por aeronaves remotamente pilotadas (RPA) são técnicas de sensoriamento remoto aplicáveis  
23 ao ambiente de produção agrícola para a identificação de variabilidade espacial das lavouras. O objetivo do  
24 trabalho é empregar tais técnicas em cana-de-açúcar para a detecção do dossel de plantas. Os dados de LiDAR  
25 e de RPA foram adquiridos em conjunto em uma área de 0,77 ha. O sistema LiDAR é composto por receptor  
26 GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com sinal de correção diferencial e um sensor a laser que emite  
27 feixes de luz no plano bidimensional. Esses equipamentos foram instalados a 4,0 m de altura em relação ao  
28 solo em um trator agrícola por meio de uma barra rígida. O pós-processamento gera uma nuvem de pontos,  
29 com cada ponto impactado pelo feixe de luz nas respectivas coordenadas geográficas. As imagens aéreas foram  
30 obtidas por uma plataforma multirrotor equipada com seis motores distanciados 0,55 m entre si, a aeronave  
31 contém uma controladora APM 2.6. Uma câmera digital com resolução espectral na faixa do visível foi  
32 utilizada para a aquisição de imagens a 0,03 m pixel<sup>-1</sup>. O voo foi executado a 40,0 m em relação a altitude local  
33 e sobreposição de imagens de 90,0% lateral e longitudinal. As imagens foram calibradas e obteve-se a nuvem  
34 de pontos. A identificação do dossel de plantas foi viabilizada por ambas as técnicas, sendo que o emprego  
35 dessas depende do nível de dados requerido para a extração de informações das lavouras.

36  
37 **PALAVRAS-CHAVE:** altura de plantas, sensoriamento remoto, variabilidade espacial

38  
39 **MONITORING SUGARCANE CROPS BY AERIAL IMAGERY AND LASER SENSORS**

40  
41 **ABSTRACT:** Laser sensors based on LiDAR (*Light Detection and Ranging*) technology and aerial images  
42 acquired by remotely piloted aircraft (RPA) are remote sensing techniques applicable to the agricultural  
43 production environment for identification of spatial variability of crops. The objective is to employ such  
44 techniques in sugarcane to detect the canopy plants. LiDAR and RPA data were purchased together in an area  
45 of 0.77 ha. LiDAR system consists of a GNSS (*Global Navigation Satellite System*) receiver with differential  
46 correction signal and a laser sensor that emits light beams in the two-dimensional plane. These equipments  
47 were installed at a height of 4.0 m in relation to the ground in an agricultural tractor by means of a rigid bar.  
48 Post processing generates a point cloud, with each point impacted by the light beam at the respective  
49 geographic coordinates. Aerial images were obtained by a multirotor platform, equipped with six motors  
50 spaced 0.55 m apart, aircraft contains an APM 2.6 controller. A digital camera with spectral resolution in the  
51 visible band was used to acquire images at 0.03 m pixel<sup>-1</sup>. Flight was performed at 40.0 m in relation to local  
52 altitude and overlap of 90.0% lateral and longitudinal images. Aerial images were calibrated and a point cloud  
53 was obtained. The identification of the canopy plants was made possible by both techniques, and the use of  
54 these depends on the level of data required for extracting crop information.

55  
56 **KEYWORDS:** crop height, remote sensing, spatial variability

57 **INTRODUÇÃO**

58 A área cultivada de cana-de-açúcar no Brasil é de cerca de 9,05 milhões de hectares com produtividade  
59 média de 72,62 t ha<sup>-1</sup>, e produção acumulada de 27,80 bilhões de litros etanol e 38,69 milhões de toneladas de  
60 açúcar (CONAB, 2017). Poucos estudos demonstram o potencial da Agricultura de Precisão (AP) como  
61 ferramenta para o manejo da variabilidade espacial inerente às lavouras. O conceito de AP envolve a  
62 identificação da variabilidade espacial e temporal dos fatores limitantes de produção e da produtividade da  
63 cultura (MOLIN et al., 2015). A identificação de variabilidade na lavoura permite, por exemplo, a aplicação  
64 localizada de insumos e a sua gestão de acordo com a identificação das demandas características do solo e de  
65 plantas.

66 As tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas na agricultura têm permitido o monitoramento e o  
67 gerenciamento da variabilidade espacial e temporal das lavouras em tempo real. Para o cultivo de cana-de-  
68 açúcar o uso de sensores óticos ativos apresenta capacidade para a predição de biomassa das plantas (PORTZ  
69 et al., 2011) e para a diferenciação de doses de nitrogênio a partir da resposta espectral da vegetação  
70 (AMARAL e MOLIN, 2011). Outras técnicas de sensoriamento remoto são mais recentes no ambiente  
71 agrícola, como os sensores de varredura (ultrassom, radar e laser) para a mensuração de parâmetros  
72 geométricos da cultura, os quais são associados às variações de produtividade e à incidência de pragas e  
73 doenças nas lavouras (ÈSCOLA et al., 2016). Os sensores a laser baseiam-se na tecnologia LiDAR (*Light*  
74 *Detection and Ranging*) para a obtenção do modelo tridimensional da vegetação, a partir da nuvem de pontos  
75 gerada pelo sensor em conjunto com um dispositivo GNSS (*Global Navigation Sattelite System*).

76 Outra alternativa de sensoriamento remoto é a utilização de sensores embarcados em Aeronaves  
77 Remotamente Pilotadas (RPA) a fim de obter a modelagem tridimensional da área de estudo por meio de  
78 imagens aéreas ortoretificadas. Essa alternativa possibilita a estimativa de parâmetros geométricos, como a  
79 altura da vegetação, a qual é uma informação essencial na estimativa da produtividade de cana-de-açúcar  
80 (PORTZ et al., 2012). Alguns estudos internacionais identificaram a praticidade e a rapidez de obtenção da  
81 altura da cultura por meio de imagens obtidas por RPA em comparação às outras tecnologias disponíveis  
82 comercialmente (HOLMAN et al., 2016). O objetivo do trabalho é empregar as técnicas de LiDAR e de RPA  
83 em uma área experimental de cana-de-açúcar para a detecção do dossel de plantas, visando o monitoramento  
84 de lavouras.

85  
86  
87 **MATERIAL E MÉTODOS**

88 Foram abordadas duas técnicas de sensoriamento remoto para a obtenção de parâmetros geométricos  
89 da cultura da cana-de-açúcar, a primeira técnica corresponde ao uso de sensor a laser e a segunda envolve  
90 imagens aéreas obtidas por RPA. O estudo foi realizado em uma área experimental (Figura 1) de 0,77 ha  
91 localizada nas coordenadas geográficas 22°40'27"S, 47°38'14"O e 549,0 m acima do nível do mar. A variedade  
92 de cana instalada foi a IAC 95-5094 nos solos classificados como Latossolo Vermelho-Eutrófico (EMBRAPA,  
93 1999) de textura muito argilosa.

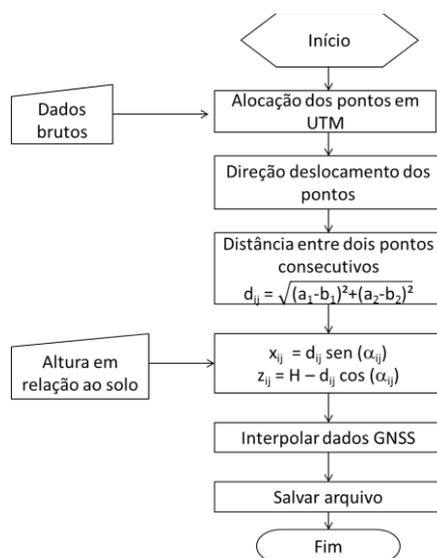


94  
95 **FIGURA 1 - Vista superior da área experimental.**

96  
97 Os dados gerados a partir das duas técnicas foram obtidos na mesma data, quando a cultura apresentava  
98 aproximadamente 320 dias após o corte. O sistema de mensuração baseado em LiDAR foi composto por um  
99 sensor a laser LMS200 (Sick AG, Alemanha), um par de receptores GNSS GR3 (Topcon, EUA) com correção  
100 diferencial RTK (*Real Time Kinematic*) e sinal L1/L2 com frequência de 10 Hz, e um computador portátil para  
101 a aquisição de dados do dossel de plantas de cana-de-açúcar de modo georreferenciado. Os equipamentos

102 foram acoplados ao trator agrícola em uma barra rígida e instalados em uma altitude local de 4,0 m em relação  
103 ao solo.

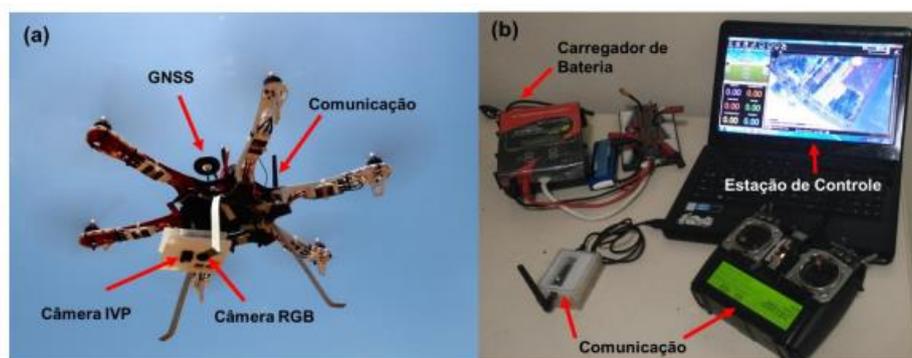
104 Para a aquisição de dados do sensor a laser o protocolo de comunicação RS422 foi utilizado com taxa  
105 de transmissão a 500 kbps e o receptor GNSS a 115200 bps (RS232). O computador possui uma rotina de  
106 programação desenvolvida para a aquisição de dados em linguagem Java no *software* Processing 2.2.1. O  
107 processamento de dados brutos do LiDAR, com a rotina de programação apresentada na Figura 2, foi  
108 desenvolvido no *software* RStudio 1.0.136. Os dados brutos obtidos contêm o georreferenciamento (latitude,  
109 longitude e elevação) da área e os dados de distância entre o sensor a laser e o dossel das plantas para cada  
110 ângulo de medição.



111  
112 FIGURA 2 - Rotina de programação para o processamento de dados brutos do LiDAR.

113  
114 A nuvem de pontos foi analisada e editada por meio do *software* CloudCompare 2.8 para a  
115 identificação do dossel de plantas de cana-de-açúcar e o nível do solo, sendo filtrados os pontos identificados  
116 como discrepantes ao perímetro da área. Cada ponto pertencente à nuvem de pontos se refere a um ponto  
117 impactado pelo feixe de luz emitido pelo sensor a laser nas condições do dossel de plantas de cana-de-açúcar  
118 com coordenadas geográficas alocadas no sistema de referência UTM.

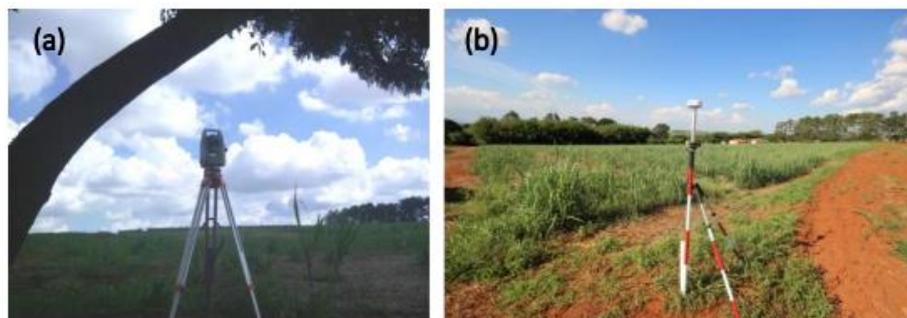
119 Para a técnica de obtenção das imagens aéreas foi utilizada uma plataforma multirrotor composta por  
120 seis motores distanciados 0,55 m entre si. O sistema propulsor é composto por seis motores elétricos  
121 propiciando uma capacidade máxima de carga total 0,80 kg e um tempo de voo de aproximadamente 10  
122 minutos, utilizando uma bateria 3,0 s de 5.500 mAh. A plataforma contém uma controladora de voo APM 2.6,  
123 composta pelos sensores: giroscópio, acelerômetro, barômetro e receptor GNSS, conforme apresentado na  
124 Figura 3.



125  
126 FIGURA 3 – Plataforma de voo (a); estação de controle (b).

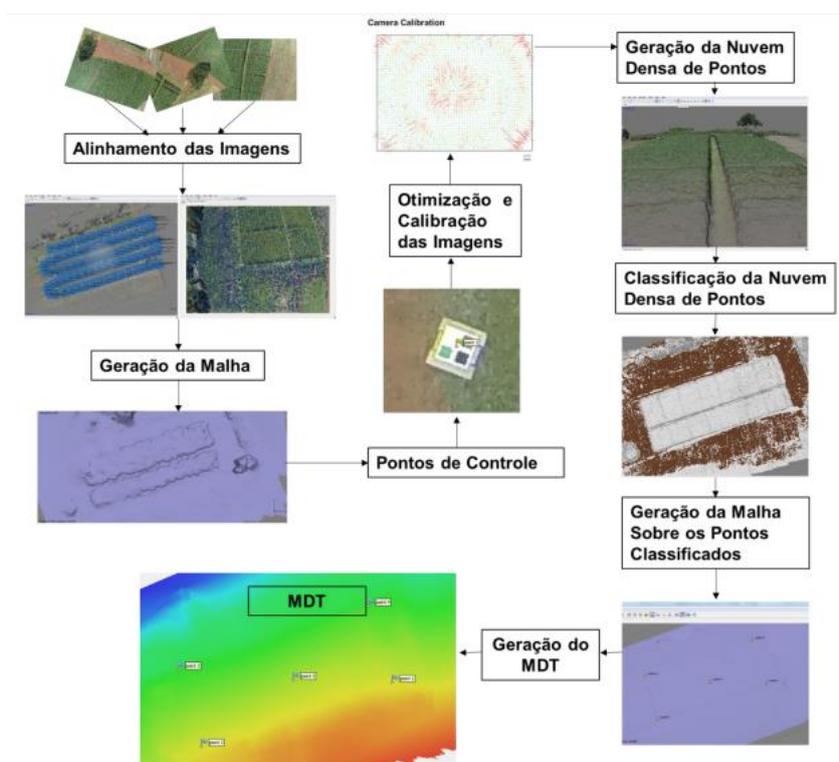
127 As rotas de voo foram pré-definidas de acordo com o sistema de piloto automático embarcado. A  
128 estação de controle possui um sistema de telemetria para a operação em frequências de 433 MHz e de 2,40  
129 GHz a fim de que, em caso de falhas, fosse realizada uma alternância entre as frequências. O *software* Mission  
130 Planner foi utilizado na estação de controle para o controlar a aeronave e realizar o planejamento da missão.

131 O voo foi acompanhado em solo, mantendo sempre o contato visual com a aeronave. Foram utilizados  
132 quatro pontos de referência posicional para as coletas aéreas por meio de estação total (Figura 4), nesses pontos  
133 foram determinados alvos de 0,25 m<sup>2</sup> com multicores e confeccionados com material emborrachado a fim de  
134 auxiliar no posicionamento dos modelos digitais gerados na etapa de processamento dos dados.



135  
136 FIGURA 4 – Estação total (a); receptor GNSS como ponto de referência das imagens (b).

137 Uma câmera equipada com sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de dimensões  
138 6,17 x 4,55 mm e bandas espectrais na faixa do visível (RGB) foi utilizada, equipada com um temporizador  
139 interno para programar as coletas de imagens a cada 2 segundos. O plano de voo foi determinado para que  
140 houvesse recobrimento lateral e longitudinal superior a 90,0% permitindo realizar a modelagem do dossel da  
141 cana-de-açúcar. O voo foi executado a 40,0 m de altura em relação ao solo em função da resolução espacial e  
142 do detalhamento necessário para a modelagem da cultura, possibilitando obter um GSD (*ground sample  
143 distance*) de aproximadamente 0,03 m por pixel. A distância máxima entre a aeronave e a estação de solo não  
144 ultrapassou 200,0 m. Para a geração dos modelos digitais, as imagens foram processadas no *software* Agisoft  
145 Photoscan (Agisoft LLC, São Peterburgo, Rússia) por meio da técnica *structure from motion* (SFM), o  
146 fluxograma de processamento é apresentado na Figura 5.



147  
148 FIGURA 5 – Fluxograma de processamento das imagens aéreas.

149 O alinhamento das imagens foi realizado para a geração de uma nuvem de pontos homólogos presentes  
150 em cada imagem, sendo que o alinhamento definiu a posição exata de cada imagem em relação ao alvo. Em  
151 seguida foi realizada a triangulação (geração da malha) para a determinação dos pontos de controle utilizados  
152 no georreferenciamento das imagens e na calibração da câmera. Após a localização dos pontos de controle foi

153 efetuada a calibração das imagens e o seu processamento para a obtenção da nuvem de pontos. A nuvem de  
154 pontos foi analisada e editada no *software* CloudCompare 2.8 para a identificação do dossel de plantas de cana-  
155 de-açúcar e o nível do solo.

156 A partir dos arquivos gerados na etapa de processamento dos dados, foi calculada a altura média de  
157 vegetação ( $\bar{H}$ ) referente a todos os pontos pertencentes a nuvem de pontos, conforme a equação 1. O coeficiente  
158 de variação (CV) foi calculado (equação 2) para a verificação da variabilidade espacial das alturas indicadas  
159 pelo sensor a laser e pelas imagens aéreas.

$$160 \quad \bar{H} = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{n} \quad (1)$$

161 em que:  $\bar{H}$ : altura média de vegetação (m);  $z_i$ : coordenada cartesiana do eixo z no ponto i (m); n:  
162 número de pontos pós-processamento.

$$163 \quad CV = \frac{100 \times \sigma}{\bar{H}} \quad (2)$$

164 em que: CV: coeficiente de variação (%);  $\sigma$ : desvio padrão (m);  $\bar{H}$ : altura média de vegetação (m).

## 168 RESULTADOS E DISCUSSÃO

169 Na Tabela 1 é apresentada a estatística descritiva dos dados processados a partir do conjunto de dados  
170 proveniente do sensor a laser e RPA na área experimental. Os dados processados do sensor laser se referem à  
171 etapa posterior ao procedimento de limpeza dos dados brutos, como a eliminação de valores discrepantes  
172 (*outliers*) e a sobreposição causada devido às dimensões das parcelas experimentais.

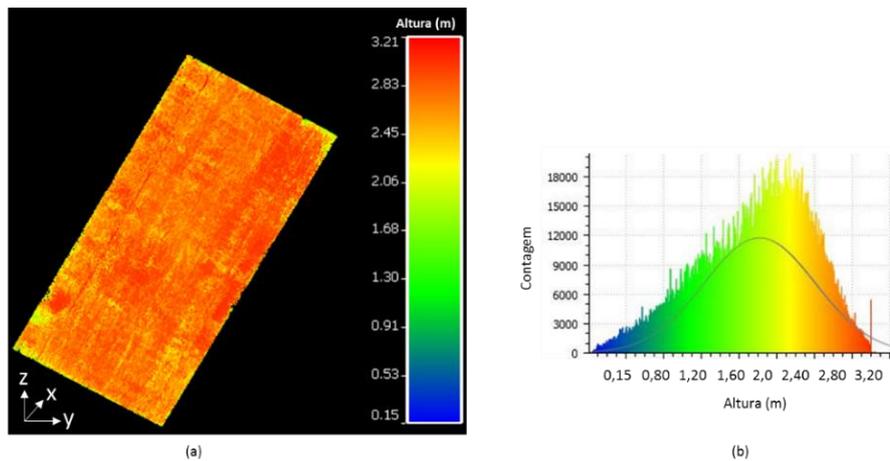
173 TABELA 1. Estatística descritiva de dados processados para as técnicas LiDAR e RPA.

Técnicas	Número de pontos	Altura de vegetação (m)					Coeficiente de variação (%)
		Mínima	Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	
LiDAR	27.066.379	0,15	3,21	1,67	1,84	0,75	44,85
RPA	1.447.072	0,00	3,76	2,48	2,86	0,99	39,92

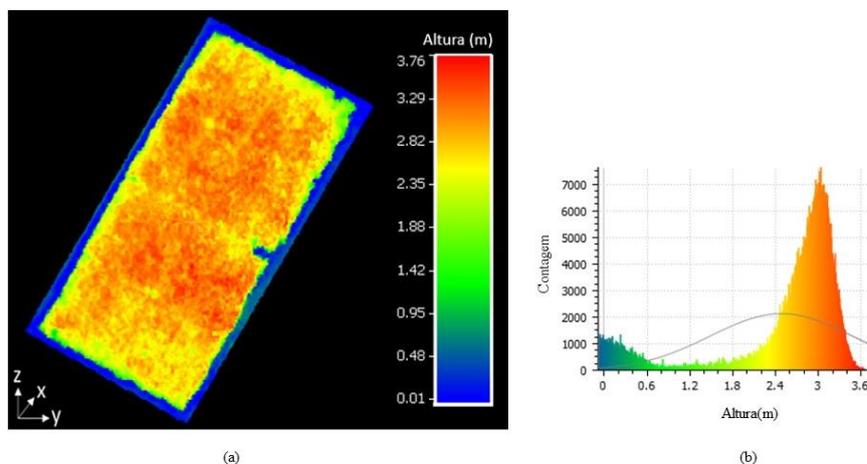
174 LiDAR: *Light detection and ranging*; RPA: aeronave remotamente pilotada

175 Uma das características do emprego de sensores a laser é a alta capacidade de aquisição de dados,  
176 como verificado na Tabela 1. O número de pontos alocados na nuvem de pontos é da ordem de 27,0 milhões  
177 em comparação a modelagem obtida através das imagens aéreas com uma nuvem de pontos na ordem de 1,44  
178 milhões de pontos. Essa diferença na quantidade de pontos entre as duas técnicas é explicada por Wallace et  
179 al. (2016) comparando o uso do sensor laser e imagens aéreas para as áreas florestais, os autores destacaram  
180 que a técnica utilizando sensor laser apresenta uma maior penetração no dossel da planta, permitindo obter  
181 mais informações relacionadas à sua estrutura vertical. Uma das razões se deve à capacidade de o sensor a  
182 laser medir diretamente a distância entre o sensor e o alvo, enquanto que as imagens aéreas são baseadas em  
183 fotogrametria, ou seja, a altura correspondente é uma distância estimada por posições relativas (SILVA et al.,  
184 2016).

185 A estatística descritiva dos dados pós-processados do sensor laser e RPA indicam um coeficiente de  
186 variação de 44,85% e 39,92% respectivamente. Nesse caso, o valor elevado do CV se refere a quantidade de  
187 pontos observados, independentemente de o objeto-alvo ser correspondente ao solo ou ao dossel de plantas. A  
188 densidade de pontos obtidos é de aproximadamente 3.515 pontos m<sup>-2</sup> para o sensor laser e de 188 pontos m<sup>-2</sup> a  
189 partir de imagens aéreas. A nuvem de pontos gerada após a filtragem do conjunto de dados do sensor a laser  
190 para a área experimental é apresentada na Figura 6. O histograma correspondente (Figura 6b) permite verificar  
191 a distribuição da altura de vegetação e o nível do solo no conjunto de dados. A Figura 7 ilustra a nuvem de  
192 pontos da mesma área utilizando a técnica de RPA.



193  
194  
195  
FIGURA 6. Nuvem de pontos obtida pelo LiDAR (a); histograma (b).



196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
FIGURA 7. Nuvem de pontos obtida por imagem aérea (a); histograma (b).

A principal diferença entre as técnicas avaliadas neste estudo é o nível de detalhamento da nuvem de pontos, sendo maior para o LiDAR em função da densidade de pontos obtida e a capacidade de penetração no dossel. No histograma correspondente do LiDAR (Figura 6b) observa-se uma maior detecção para os valores intermediários da estrutura vertical das plantas, altura de 2,0 m, enquanto que para a nuvem de pontos gerada por imagens aéreas (Figura 7b), é possível observar uma faixa maior de dados apenas na superfície do dossel devido às características da metodologia empregada no estudo.

As técnicas de sensoriamento remoto a partir de sensores a laser e de imagens aéreas demonstraram potencial de aplicação no ambiente de produção de cana-de-açúcar, sendo que o emprego de cada uma depende da problemática abordada e da acessibilidade às tecnologias por parte do usuário. Para o monitoramento de lavouras, tais técnicas podem ser utilizadas de forma integrada para o acompanhamento do ciclo de produção. A perspectiva é de que essas tecnologias possam servir como base para as recomendações agrônomicas no contexto da AP.

## CONCLUSÃO

As técnicas de sensoriamento remoto envolvendo LiDAR e imagens aéreas demonstraram potencial na detecção do dossel de plantas de cana-de-açúcar. Os resultados se diferem, principalmente, na capacidade de detecção do solo e na densidade de pontos, implicando em diferentes níveis de detalhamento do dossel de plantas e da condição da lavoura.

**AGRADECIMENTOS:** À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão das bolsas de estudos e à Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) pela disponibilidade da área experimental.

224 **REFERÊNCIAS**

225

226 AMARAL, L. R. do; MOLIN, J. P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em  
227 cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 16, n. 1, p. 1633-1642, 2011.

228 CONAB. (2017). Companhia Nacional de Abastecimento. Indicadores da agropecuária. Brasília. Disponível  
229 em: <[https://www.novacana.com/pdf/18042017090454\\_Conab\\_-\\_4\\_Levantamento\\_2016-17\\_180417.pdf](https://www.novacana.com/pdf/18042017090454_Conab_-_4_Levantamento_2016-17_180417.pdf)>.  
230 Acesso em: 16/07/2017.

231 EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**.  
232 Brasília: CNPS, 1999. 412p.

233 ESCOLÀ, A.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; RUFAT, J.; ARNÓ, J.; ARBONÉS, A.; SEBÉ, F.; et al.  
234 Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract  
235 information from canopy point clouds. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 111-132, 2016.

236 HOLMAN, F. H.; RICHE, A. B.; MICHALSKI, A.; CASTLE, M.; WOOSTER, M. J.; HAWKESFORD, M.  
237 J. High Throughput Field Phenotyping of Wheat Plant Height and Growth Rate in Field Plot Trials Using UAV  
238 Based. **Remote Sensing**. v. 8, n. 12, p. 1031-1055, 2016.

239 MOLIN, J. P.; COLAÇO, A. F.; AMARAL, L. R. do. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. Piracicaba: Oficina de  
240 Textos, 224 p., 2015.

241 PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass  
242 on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 33-44, 2011.

243 PORTZ, G.; AMARAL, L. R. do; MOLIN, J. P. Measuring sugarcane height in complement to biomass sensor  
244 for nitrogen management. In: **International Conference on Precision Agriculture**, 11, 2012, Indianápolis.  
245 Proceedings...Monticello: ISPA.

246 SILVA, C. A. da; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S. dos; AMARO, V. E.; BICHO, C.  
247 P.; SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT,  
248 GNSS e LiDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, p. 73-94, 2016.

249 WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKÝ, Z.; TURNER, D.; VOPĚNKA, P. Assessment of Forest  
250 Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion  
251 (SfM) Point Clouds. **Forests**, v. 7, n. 3, p. 62-78, 2016.